Universitätsklinik und Poliklinik für Hals-,Nasen- und Ohrenkranke
Direktor: Prof. Dr. W. Kley

ÜBER EIN ELEKTRO-OKULOGRAPHISCHES VERFAHREN MIT HILFE EINES AC-VERSTÄRKERS

I n a u g u r a l - D i s s e r t a t i o n

verfaßt und der

Hohen Medizinischen Fakultät

der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

zur
Erlangung der medizinischen Doktorwürde

vorgelegt von

Rainer Wodatschek

Würzburg, den 16.6.1980

1981

Universitätsklinik und Poliklinik für Hals-,Nasen- und Ohrenkranke
Direktor: Prof. Dr. W. Kley

ÜBER EIN ELEKTRO-OKULOGRAPHISCHES VERFAHREN MIT HILFE EINES AC-VERSTÄRKERS

I n a u g u r a l - D i s s e r t a t i o n

verfaßt und der

Hohen Medizinischen Fakultät

der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

zur
Erlangung der medizinischen Doktorwürde

vorgelegt von

Rainer Wodatschek

Würzburg, den 16.6.1980

Referent : Prof. Dr. C.F.Claussen

Koreferent: Prof. Dr. W. Kley

Dekan : Prof. Dr. K.-H. Wulf

Tag der mündlichen Prüfung: 28.1.1981

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Universität Würzburg

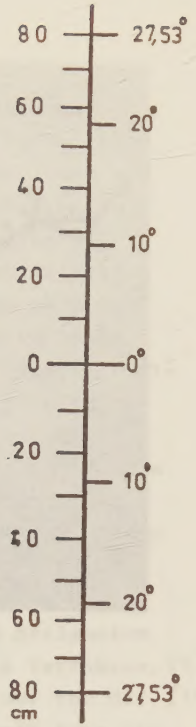
VORWORT

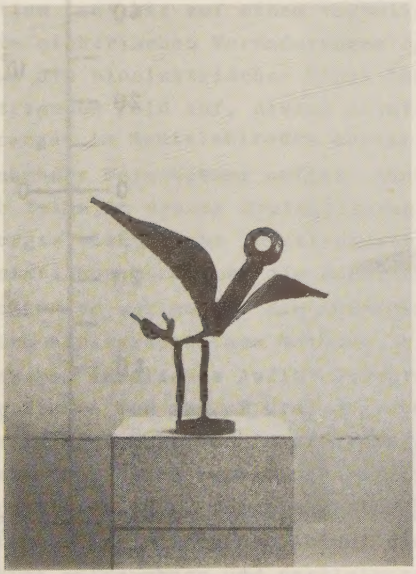
Die dieser Dissertation zugrunde liegenden praktischen Versuche folgen dem Schema der ersten optosensorischen Dissertation von KÖTZ aus der neurootologischen Arbeitsgruppe von CLAUSSEN.Es wurde eine differenziertere und umfangreichere Analyse- und Synthesetechnik der Augenbewegungen eingesetzt.
Diese Technik wurde in einer größeren okulomotorischen Untersuchung von TONDROW angewandt,auf dessen Disser- (27)
tation hiermit verwiesen wird.Besonderer Dank gilt Herrn SPORRER,der die Syntheseprogramme auf der EDV-Anlage im Universitäts-Rechenzentrum Würzburg ausgearbeitet hat, sowie dem akademischen Direktor beim physikalischen Institut Würzburg, Herrn Dr. A. PRZYBYLSKI für freundliche Unterstützung bei physikalischen Experimenten.
Das Thema dieser Arbeit wurde von Herrn Prof.Dr.C.F. CLAUSSEN im Rahmen des umfangreichen neurosensoriellen Programmes InSan I-0776-V-063 gestellt.Er hat freundlicherweise die Anleitung,Betreuung und Diskussion der Arbeit fortlaufend vorgenommen. Die Untersuchungen wurden im neurootologischen Labor von Prof.Dr.CLAUSSEN durchgeführt.
Um dem Leser zu ermöglichen,sich selbst Eindrücke von okulären Bewegungsmustern zu verschaffen,wurden zahlreiche Originalbilder in die Arbeit aufgenommen.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543519_0073

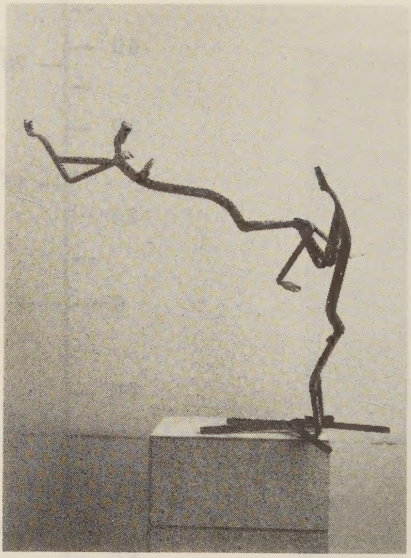
1





2

Abb.1



3

4

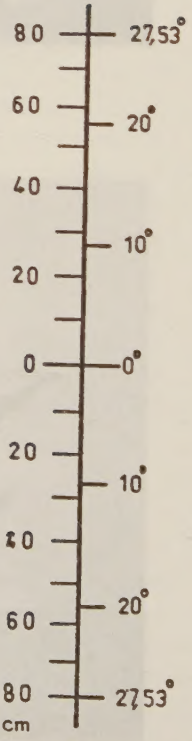


Abb.2

EINLEITUNG

Seit am Beginn des Jahrhunderts erstmals Augenbewegungen registriert worden waren, erkannte man in ihnen einen sehr nützlichen Parameter vieler zentraler Funktionen und bemühte sich, die verwendeten Aufzeichnungsverfahren zu optimieren. Die Anforderungen an die Methode waren einerseits einfache Durchführbarkeit mit geringer Belästigung des Patienten, andererseits aber auch eine räumlich und zeitlich exakt analoge Abbildung des okulären Bewegungsmusters. Die immer noch bestehende Unmöglichkeit, beide Anforderungen voll zu erfüllen, macht alle praktizierten Methoden zu Kompromisslösungen, die jeweils mehr auf Seiten ersterer oder letzterer Bedingung liegen. So wurden technisch prinzipiell verschiedene Methoden entwickelt. Sie beruhen auf den drei mit jedem Blicksprung verbundenen physikalischen Phänomenen:

1) Die rein mechanische Bulbusbewegung. Sie kann durch einen an ihm fixierten Zeiger direkt auf einem geeignetem Träger registriert werden. Dies ist das älteste Verfahren. (2)

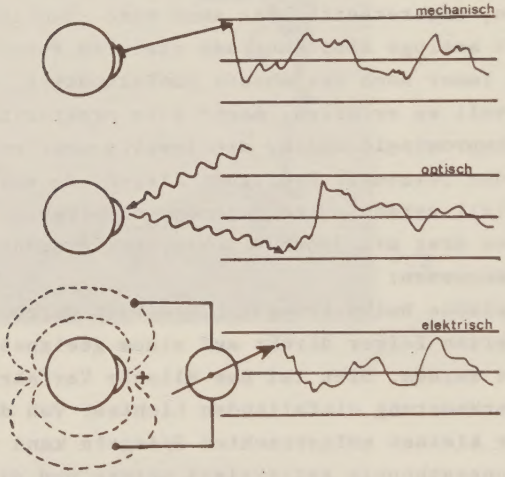
2) Die optische Veränderung einfallenden Lichtes. Von der (15;29)
Cornea selbst oder kleinen aufgebrachten Spiegeln kann ein Lichtstrahl stellungsabhängig reflektiert werden und die Rotation indirekt auf einem vorbeilaufenden Film aufzeichnen.

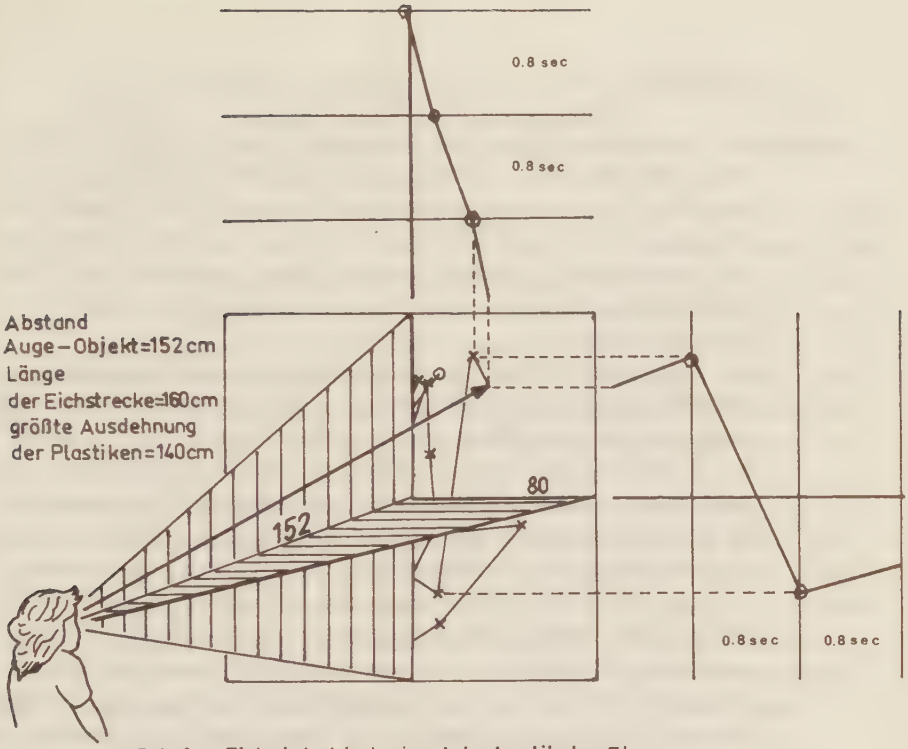
3) Die elektrischen Veränderungen der Augenumgebung. Der Bulbus als bioelektrischer Dipol baut ein charakteristisches elektrisches Feld auf, dessen Rotationen als Potentialänderungen in Hautelektroden abgegriffen und nach entsprechender Verstärkung aufgezeichnet werden kann.

Durch feine, in weiche Kontaktlinsen eingebrachte und von außen (6)
versorgte elektrische Induktionsschleifen wurden neuerdings Bulbusrotationen auch über die Änderung magnetischer Felder registriert.

Im Folgenden wollen wir die Anwendung einer binokulären elektro-okulographischen Methode bei 150 Probanden vorstellen. Da höheres räumliches Auflösungsvermögen beim Auge nur in einem Winkel von max. 2 Grad möglich ist, können genaue (15)
visuelle Eindrücke von in größerem Winkel erscheinenden Objekten nur durch Summation zeitlich aufeinanderfolgender Informationen, d.h. durch okuläres Abtasten des Musters entstehen. Wir wollen den Ablauf dieses binokulären scanning aufzeichnen und vergleichbar machen.

Die Präzision der Methode und ihre Anwendbarkeit sollen kritisch abgeschätzt und allgemeine Prinzipien der Augenbewegungen aufgezeigt werden.
Als optischen Stimulus haben wir vier Stahlplastiken von CLAUSSEN verwendet.(Abb.1 u.2)





Pat.131 55.06° – Eichwinkel in horizontaler/vertikaler Ebene

Abb.3

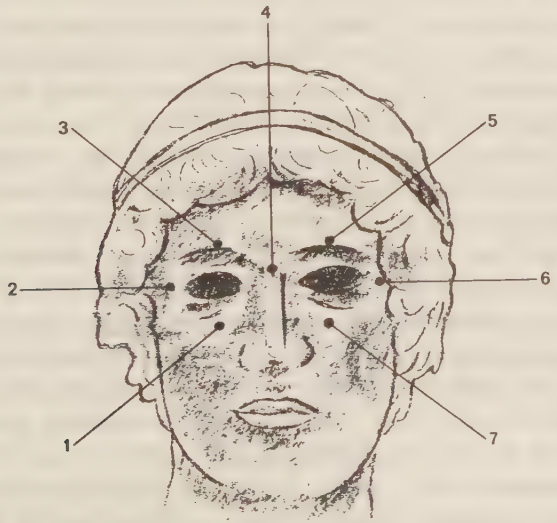


Abb.4

METHODIK

Die Retina des Auges ist aufgrund ihrer bioelektrischen Aktivität mit ca. 1,5 mV negativ gegenüber der Cornea (5;16;23) geladen. Der so entstandene Dipol liegt in der Längsachse des Auges und in seiner Verlängerung nach vorn steht das fixierte Objekt, während der hintere, negative Pol in der Fovea centralis liegt. Der Dipol bezeichnet also die Blickrichtung.

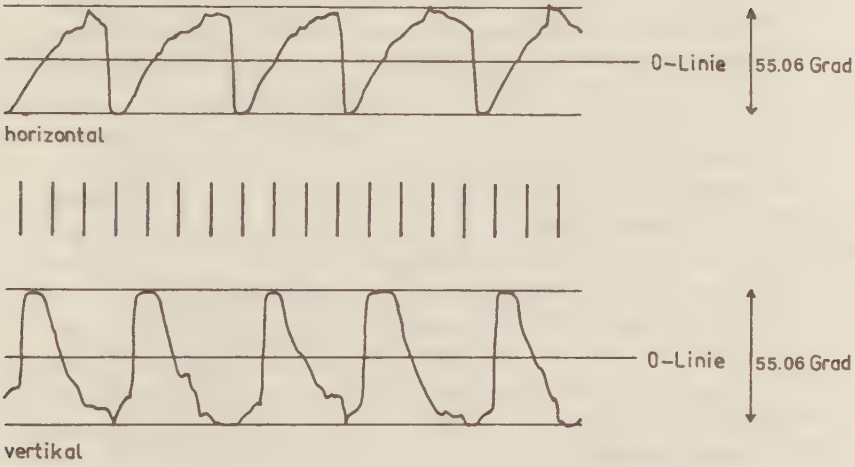
Es liegt somit nahe, bei Untersuchung der Blickbewegungen zunächst elektrische Phänomene aufzuzeichnen. In der neuro-otologischen Abteilung der HNO-klinik Würzburg stand uns mit einem Hellige 8-Kanal Elektronystagmographen das nötige Instrumentarium zur Verfügung. Um binokuläre Bewegungen in allen Richtungen zu verfolgen ist eine mindestens 4-spurige Aufzeichnung erforderlich: je eine Spur für horizontale und vertikale Bewegungen jeden Auges. Wir verwendeten bei unseren Versuchen sieben massive Silberstempelelektroden, die mit hautfreundlichem Pflaster in den in Abb. 4 gezeigten Positionen auf der vorher mit Alkohol gereinigten Haut fixiert wurden. Beim Blick nach oben z.B. führt eine Annäherung der vorderen positiven Augenpole an die Elektroden 3 und 5 und eine Näherung der negativen Retinae an die Elektroden 1 und 7 zu einer positiven Spannung in den erstgenannten Ableitungen gegenüber einer negativen in letzteren. Bei fortlaufender Registrierung der Potentialdifferenzen an den Elektrodenpaaren 1/3 , 2/4 , 4/6 und 7/5 in vier verschiedenen Spuren war es möglich, nahezu unabhängig voneinander die Stellung beider Augachsen und in deren Verlängerung die Position des gerade fixierten Punktes zu konstruieren. Wenn man das corneo-retinale Potential als konstant annimmt, lassen sich in den vier Elektrodenpaaren Spannungen ableiten, die innerhalb gewisser Grenzen der augenblicklichen Bulbusabweichung von der Normalstellung proportional sind. Es handelt sich (23) um rein statische Spannungsdifferenzen, die nur vom Winkel des Dipols abhängen und nicht - etwa wie bei einer Dynamomaschine - durch Rotationsbewegungen eines elektrischen/magnetischen Feldes zu einem Leiter entstehen. (9)

Bei in maximaler Abduktionstellung verharrenden Augen ist also ein Plateau maximaler Spannungsdifferenz ableitbar: Das Potential gibt Bulbusstellungen, nicht deren Änderung wieder.
Durch eine ionenhaltige Elektrodencreme wurden Überleitungswiderstände zwischen Haut und Elektroden herabgesetzt. Das verwendete Hellige-ENG-Gerät(Simpliscriptor) erlaubt über eine eingebaute Frequenz-Meßbrückenschaltung eine getrennte Bestimmung der Elektroden-Hautwiderstände für jede der sieben Ableitungen. Wir achteten vor Versuchsbeginn auf Werte unter 10 KΩ ,die notfalls durch nochmaliges Entfernen der Silberstempel und Reinigen der Haut mit Alkohol erreicht wurden.
Als Durchschnittswert an allen Elektroden ermittelten wir einen Widerstand von 6 kΩ,die Werte waren allerdings,wie auch anderweitig beschrieben,extrem weit gestreut.Die Ver- (26)
stärkung der abgeleiteten,nur Zehntel mV großen Potentiale geschah in dem Gerät zunächst über AC-Vorverstärker mit Zeitkonstanten von 1 Sekunde.Da ein ständiges Nachregeln während der Untersuchung, wie es wegen der ständigen Driftpotentiale beim Gleichstromverstärker nötig ist, ein quantitatives elektro-okulographisches Arbeiten unmöglich macht, stellt der Potentialschwund und dadurch die Verzeichnung niederfrequenter Eingangssignale beim AC-Verstärker das kleinere Übel dar. (13;16)
Wir haben der Aufzeichnung der Bulbusbewegungen beim Betrachten der Plastiken eine Eichung mit dem Ziel vorangestellt, für jeden Probanden individuell die Größe der abzuleitenden Potentiale in Abhängigkeit von der Stellung der Bulbi in µV/Winkelgrad zu ermitteln. Diese Größe wollen wir "spezifische Potentialdifferenz" nennen und wir ermitteln sie für jedes Auge getrennt und jeweils gesondert für Horizontal- und Vertikalbewegungen. Obwohl ihre Aussagekraft äußerst gering ist, geben wir an, welche Größe sie im Mittel bei unseren Probanden annahm:

Rotation in der Sagittalebene	rechts - 9,34 µV/Grad
	links - 8,83 µV/Grad
Rotation in der Horizontalebene	rechts - 7,44 µV/Grad
	links - 7,20 µV/Grad

Für die Eichung erwies sich das Gerät zum Eye-tracking nach CLAUSSEN als besonders geeignet. Es handelt sich dabei um einen Stab, auf dem durch in dichten Abständen angeordnete und kurz nacheinander aufleuchtende Lämpchen der Eindruck eines sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegenden flackernden Lichtes erzeugt wird. Ist das Licht an einem Ende des Stabes angelangt, beginnt es am anderen Ende erneut in gleicher Richtung zu laufen. Wir ordneten den Stab so vor den Probanden an, daß der Lichtpunkt sich für sie mit einer Geschwindigkeit von 16 Winkelgrad/sec. über einen Winkel von 55,06 Grad bewegte, und zwar nacheinander je 10 mal von oben nach unten, von links nach rechts, von unten nach oben und von rechts nach links. Bei dieser Geschwindigkeit können (8:18 die Augen einem Stimulus exakt und praktisch verzögerungsfrei folgen. Die Winkelgeschwindigkeit ist tatsächlich in der Mitte etwas höher als in der Peripherie. Der Arcus-Tangens-Fehler ist aber vernachläßigbar klein. Die Probanden, die ständig geneigt waren, den Sprung des Lichtpunktes von einem Ende des Stabes an den Anfang mit den Augen vorwegzunehmen, wurden ständig ermahnt das Licht wirklich über die ganze Strecke hinweg zu verfolgen und dabei die Kopfhaltung in der Stütze nicht zu verändern. Das Vorwegnehmen des Wendezeitpunktes in einer natürlichen Erwartenshaltung wurde auch beim Verfolgen eines harmonisch schwingenden Pendels beobachtet und stellt keinen Nachteil speziell dieser Methode dar. (10) Bezüglich ihrer Richtung definieren wir die Schnittlinie der Ebenen der waagerechten und senkrechten mit den Augen abgefahrenen Winkel relativ zum Kopf des Probanden als Blick geradeaus, auch wenn sie nicht in der anatomischen

OPTOKINETISCHER NYSTAGMUS —EICHEN—



EOG-GLÄTTEN, ELIMINIEREN VON ARTEFAKTEN

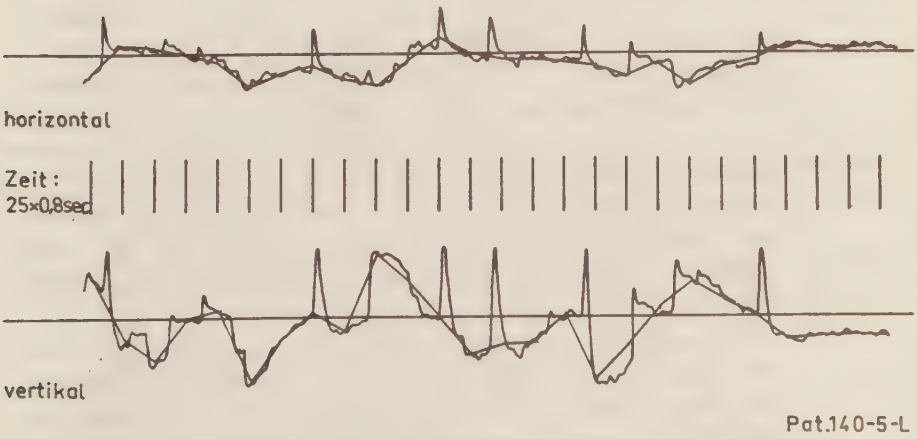
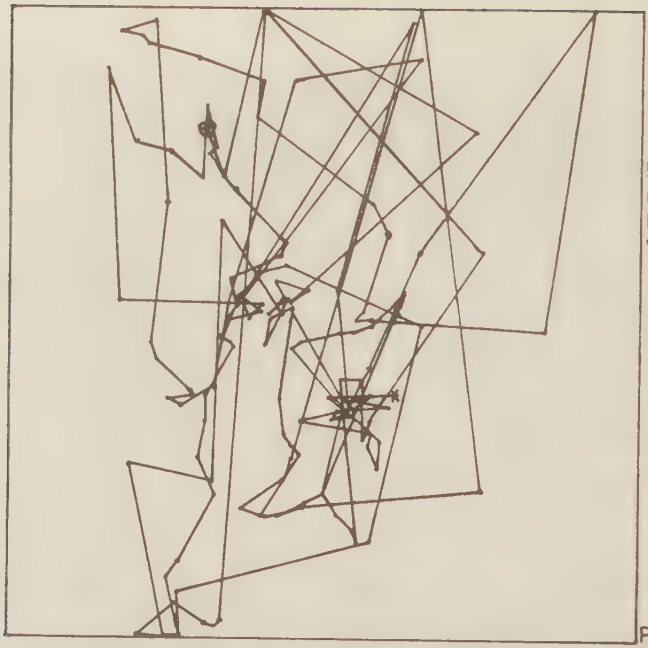


Abb.5

Sagittalebene (verdrehter Kopf) oder Horizontalebene (gekippter Kopf) liegt. (Abb. 3) Ihr entspricht bei uns per definitionem eine Rotation der Bulbi um Null Grad und auf dem Registrierpapier ein Zeigerausschlag von Null mm - entsprechend der Mittelposition zwischen Minima und Maxima der Tracking-Aufzeichnungen - auch wenn dieser nicht mit dem in Ruhestellung (Potentialdifferenz = 0) übereinstimmt. (Abb. 5) Schließlich erscheint dem Probanden in dieser Blickrichtung später das Zentrum jeder Plastik und sie entspricht auch der Mitte des Computer-Videogramms (CVG). Wir haben natürlich versucht, die Abweichung unserer Bezugslinien von der Richtung des anatomischen Geradeausblickens durch Einstellen des Kopfes möglichst klein zu halten. Abb.3 zeigt einen Probanden und die horizontalen und vertikalen Eichwinkel, dazu vergrößert die elektrookulographischen Aufzeichnungen der Bewegungen eines Auges, die als vektorielle Projektionen des Weges des Fixationspunktes (Pfeilspitze) erscheinen. Um möglichst winkelgetreue Abbildungen zu erreichen, konnten wir als spezifische Potentialdifferenzen nicht den pauschal angegebenen (5) Wert von 12 µV/Winkelgrad verwenden, sondern mußten bei der weiteren Verarbeitung der elektro-okulographischen Aufzeichnungen jedes Probanden für jede der 4 aufgezeichneten Spuren eigene Werte als Faktoren einführen. Die Größe der abzuleitenden Potentialdifferenzen pro Winkelgrad Bulbusbewegung variiert nämlich mit den unterschiedlichen Elektroden-Hautwiderständen, mit den verschiedenen corneo-retinalen Potentialen und mit der wechselnden Entfernun der Elektroden vom Auge. Alle diese Schwankungen können durch Berücksichtigung der richtungsabhängigen, für jedes Auge und jeden Patienten einzeln ermittelten spezifischen Potentialdifferenzen ausgeglichen werden.

Auf dem Registrierpapier haben wir die 0-Linien in die Mittelposition zwischen die beiden parallelen Hüllkurven der sägezahnförmigen Aufzeichnungen des beim Eichen induzierten optokinetischen Nystagmus gelegt. In Abb. 5 oben entstanden die Eichnystagmen bei Rotation um den

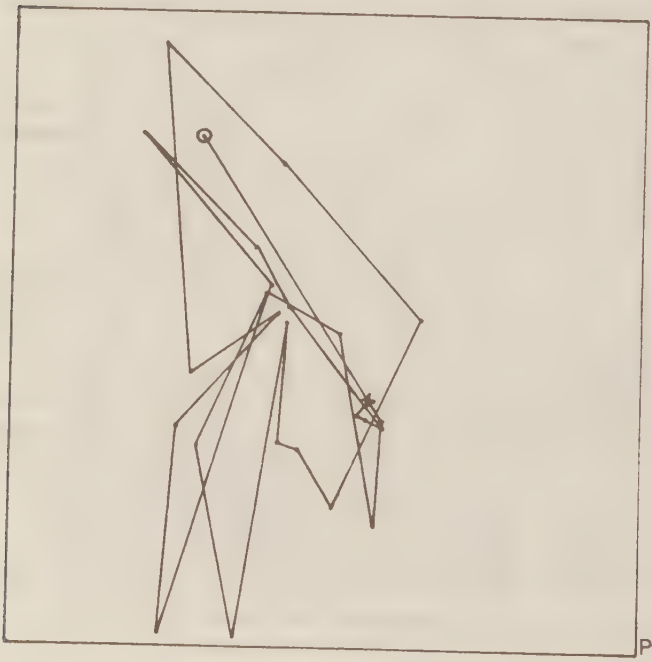
Winkel von 55,06 Grad. Die Horizontal- und Vertikalspur sind nicht simultan aufgezeichnet, sondern es handelt sich um nacheinander erfolgte Eichvorgänge. Zwischen beiden Spuren ist ein 0, 8-sec.-Zeitrastraster eingezeichnet. Die Papiergeschwindigkeit betrug 7,5 mm/sec.. Wenn die Positionen der Mittellinien bei Eichung der Blickbewegungen von oben nach unter bzw. von rechts nach links und die der Gegenrichtung nicht übereinstimmten, wurde die Mittelposition für die jeweilige 0-Linie angenommen. Ebenso wählten wir den Mittelwert, wenn Differenzen in den Amplituden der Eichnystagmen bestanden. Wie zu erwarten, waren aber intraindividuelle Abweichungen stets sehr niedrig; sie überschritten nie 10 % der Amplituden und lagen bei der Position der o-Linien immer unter 1mm, entsprechend weniger als 2,5 Winkelgrad. Die elektrischen Amplituden-Differenzen zwischen rechtem und linkem Auge, sowie zwischen Horizontal- und Vertikalbewegung bei einem Probanden sind hingegen beträchtlich und werden durch die 4 verschiedenen spezifischen Potentialdifferenzen ausgeglichen. Nach dem Eichen haben wir bei jedem Probanden die Frequenz und Richtung des Spontannystagmus bei geschlossenen und geöffneten Augen ermittelt. Anschließend wurden die 4 Stahlplastiken von CLAUSSEN aus Abb.1 u.2 vorgesetzt. Die Bilder zeigen die Figuren aus dem Blickwinkel des Probanden; zum Vergleich daneben eine Winkelgradskala. Plastik 2 und 3 wurden jeweils 2 mal gezeigt; Figur 2 einfach und nach Drehen des Patienten gegen den Uhrzeigersinn und Figur 3 einfach und nach Drehung im Uhrzeigersinn. Dabei wurde immer mit 3 Winkelgrad/sec.^{2} bis auf 30 Grad/s. beschleunigt; die Abbremsung erfolgte schlagartig. Vor der Untersuchung wurden die Probanden auf eine abschließende Befragung über die erkannten Details und den vermeintlichen Sinn der Plastiken vorbereitet, um auch die weniger interessierten unter ihnen zu einem genauen Betrachten zu motivieren. Die Zeit betrug jeweils 20 sec. für eine Plastik; Anfang und Ende wurden durch die Aufforderung,



Aufzeichnung über
20 sec., 150 Meßwerte
Zeitraster 0,13 sec.

Blinks (große Dreiecke)
nicht eliminiert.
Lange Strecken, hohe
Winkelgeschwindigkeit

Pat.104-5-L

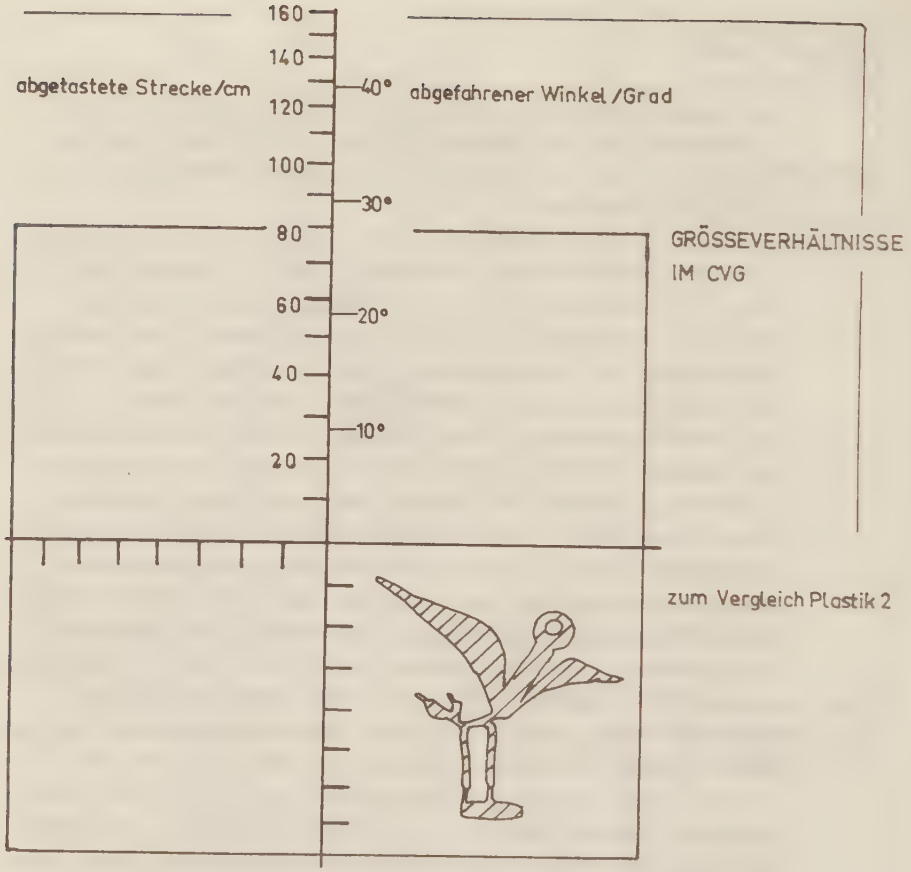


Aufzeichnung über
20 sec., 26 Meßwerte
Zeitraster 0,8 sec.

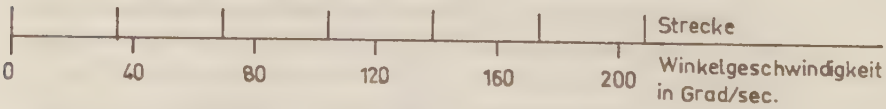
Pat.104-5-L Abb.6

die Augen zu öffnen, bzw. zu schließen gegeben. Schließlich haben wir die Probanden formlos über die Plastiken befragt, wobei sie die Eindrücke aus dem Gedächtnis reproduzieren mußten.

In den 6 verschiedenen (Figur 1, 2, ②, 3, ③, 4) je 20 sec. langen Aufzeichnungen, bestehend aus je 4 Spuren (R↕ , L↕ , R↔, L↔) haben wir dann die Bezugslinien in den beim Eichen ermittelten Positionen eingezeichnet. Zur weiteren Auswertung der so gewonnenen Elektro-Okulogramme mußten die kontinuierlichen Aufzeichnungen digitalisiert, d. h. in Zahlenreihen abgebildet werden. Daraus konnten wir dann Kurverzüge zeichnen, die dem auf eine Frontalebene projezierten, während der 20 sec. zurückgelegten Weg des Fixationspunktes jedes Auges entsprechen. Dafür wurden Zahlenpaare aus je einem Meßwert aus einer Horizontal- und dem zeitgleichen Wert aus der entsprechenden Vertikalspur als Kartesische Koordinaten benutzt. Wir haben die Abweichungen der Aufzeichnung von der 0-Linie in Abständen von 0,8 sec. ausgemessen, d. h. der Kurververlauf wird durch 26 Werte charakterisiert. Kürzere Ausschläge bleiben dabei unberücksichtigt, soweit ihre Frequenz über ca. 1,5 Hz liegt, sonstige Abweichungen der geglätteten Kurven vom Original wurden aber minimal gehalten. Die hohen Spitzen, die durch Lidschlußbewegungen bedingt sind, haben wir natürlich abgeschnitten. Abb. 5 , unten, zeigt die simultanen Aufzeichnungen der Horizontal- und Vertikalbewegungen eines linken Auges beim Betrachten von Plastik 3. Zwischen beiden Spuren das 0,8 sec.-Zeitraster. Zum Vergleich sind die geglätteten Kurven eingezeichnet, wie sie in den Zahlenreihen wiedergegeben werden. Der Informationsverlust durch das grobe Zeitraster betrifft vor allem die hochfrequenten Sakkaden in längeren Fixationsperioden und rasch wechselnde Fixationspunkte unterhalb von 0,8 sec. Dauer. Abb. 6 zeigt den Unterschied der okulären Bewegungsmuster, synthetisiert aus Werten mit Zeitabständen von 0,13 sec. (oben) und 0,8 sec. (unten).



WINKELGESCHWINDIGKEITEN IM CVG (ZEITRASTER 0,27 SEC.)



WINKELGESCHWINDIGKEITEN IM CVG (ZEITRASTER 0,8 SEC.)

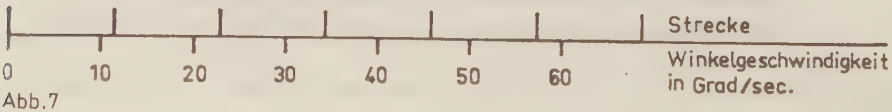


Abb.7

In dem Bild mit dem feineren Zeitraster wurden die Blinks nicht eliminiert. Der Abb.6 liegt das Okulogramm aus Abb.5 zugrunde. Nachdem die EOG's (Elektrookulogramme) aller Probanden in der beschriebenen Weise ausgemessen waren, haben wir alle Werte, sowie sämtliche beim Eichen ermittelten spezifischen Potentialdifferenzen im Rechenzentrum Würzburg auf Magnetplatten gespeichert. Die Datei umfasst über 94 000 Werte. Ein X-Y-Schreiber der Rechenanlage übernahm dann das Zeichnen der Punkte und ihrer Verbindungslinien aus den simultanen vertikal- horizontal-Wertepaaren. Alle Werte (mm) wurden in abgegriffene Spannungen (µV) umgerechnet und mit dem Reziprokwert der zugehörigen spezifischen Potentialdifferenz (Grad/µV) multipliziert, um Winkelgrad zu erhalten, nach denen dann gezeichnet wurde.(Das Gerät schrieb 10 mm-Amplituden bei 200 uV Eingangsspannung.)Ein mit dem Auge abgefahrenes Quadrat wird jetzt bei jedem Probanden wirklich als Quadrat und nicht als irgendein anderes Rechteck abgebildet. Wir haben die Zeichnungen Computer-Videogramme (CVG) genannt. Alle Längen im CVG sind idealisiert Winkelgrad Augenbewegungen proportional. Jeder einem Wertepaar entsprechende Punkt ist durch ein Kreuz markiert und mit jedem folgenden durch eine gerade Linie verbunden, deren Länge der mittleren Winkelgeschwindigkeit des Auges in dem entsprechenden Zeitintervall proportional ist.Der erste Punkt ist durch einen Kreis markiert. Zum Vergleich wurde ein Quadrat eingezeichnet, dessen Seitenlänge den beim Eichen abgefahrenen 55,06 Grad entspricht. Abb.7 zeigt die Größenverhältnisse im CVG, dazu zum Vergleich maßstabgerecht Plastik 2 im 4. Quadranten.(Dies entspricht nicht ihrer Position beim Betrachten) Die Winkelgradskala ist linear; links daneben die Skala der abgetasteten Strecke in der Ebene des Objekts.Die mittlere Winkelgeschwindigkeit der Bulbi zwischen 2 Punkten,wie sie für die CVGs wie die in Abb.6 gelten,ist unten aufgezeichnet.
Wir haben von rechtem und linkem Auge getrennte CVG's anfertigen lassen und außerdem je 1 aus den Durchschnittswerten der Koordinaten beider Augen (fiktives Mittelauge).

Beim Vergleich der ca. 3 000 CVG's haben wir dann nach strukturellen Kriterien Probandengruppen gebildet und davon Punktwolken aller Wertepaare plotten lassen, deren Dichte die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Fixationspunktes in einem Areal angibt. Das Plotten von Durchschnitts-CVG's mehrerer Probanden (anstelle von Punktwolken) aus den Mittelwerten aller gleichzeitig gemessenen Werte war nicht möglich, da diese, außer am Anfang, zu allen Zeitpunkten normal um sehr wenig variierende Werte verteilt sind. Zur genauen Analyse der Augenfolgebewegungen beim Eichen haben wir außerdem noch CVG's mit sehr feinem Zeitraster (0,27 sec.) manuell angefertigt. Um methodische Fehler auszuschließen, haben wir noch bei 5 Probanden, die wir vorher elektro-okulographisch untersucht hatten, die Augenfolgebewegungen beim Eichen in vertikaler Richtung mit 18 Bildern/sec. gefilmt. Die Bewegung des Stimulus war wie oben schon beschrieben, bestand also aus einer langsamen Phase und dem schnellen Sprung zurück. Wir konnten nur Probanden mit hellen Augen verwenden, da hier die Grenzen der Pupillen gut sichtbar sind. Die freiwilligen Versuchspersonen wurden aus nächster Nähe mit einer 1000-Watt-Lampe angestrahlt, so daß die Pupillen im Film fast punktförmig erschienen. Die oberen Augenlieder wurden auch beim Blick nach unten durch Klebestreifen oben gehalten. Wir haben dann die Bilder der Filme einzeln auf einen Schirm projeziert und die Pupillenstellungen ausgemessen. Als Bezugspunkt diente dabei ein schwarzes Kreuz, das wir den Pobanden auf die Stirn gemalt hatten. Nach den Werten konnten wir dann wieder die Wege der Fixationspunkte rekonstruieren. Insbesondere bei den schnellen Blicksprüngen konnten wir mit einem Zeitraster von 0,06 sec. arbeiten. Die erhaltenen Bilder wurden mit den elektro-okulographisch erhaltenen verglichen. Bei 5 bereits vorher untersuchten Probanden haben wir den Einfluß der Elektrodenpositionen auf die elektrisch wiedergegebenen Bewegungsmuster untersucht. Die durchwegs zuverlässigen Probanden produzierten das definierte Ur-Signal,

also eine optisch induzierte Blickfolgebewegung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit in senkrechter bzw. waagrechter Richtung. In 2 Fällen haben wir auch diagonal in verschiedener Richtung und unter verschiedenen Winkeln laufende Stimuli verwendet. Die Signale auf dem Papier wurden dann auf ihre Abhängigkeit von den verschiedenen Ableitpositionen hin untersucht. Variiert wurden die Abstände der Elektroden vom Orbitarand sowie die Lage der 3 Horizontalableitungen relativ zueinander. Schließlich haben wir noch untersucht, wie das elektrische, in den Elektroden abgegriffene Signal von unserem Registriergerät wiedergegeben wird. Es handelte sich um AC-Vorverstärker, die über Gleichstromvertärker die Schreibwerke erregten. Wir haben die Schreiberausschläge in Abhängigkeit von der Amplitude rechteckiger und sägezahnförmiger Eingangsspannungen verschiedener Frequenz untersucht. In einem Modell haben wir dann noch die physikalischen Bedingungen nachgebaut unter denen Dipolrotationen zu Potentialdifferenzen in Elektroden an der Grenzfläche des umgebenden leitenden Mediums führen. Mit den Modellen war es möglich, zunächst rätselhafte Phänomene bei der elektro-okulographischen Ableitung zu erklären.

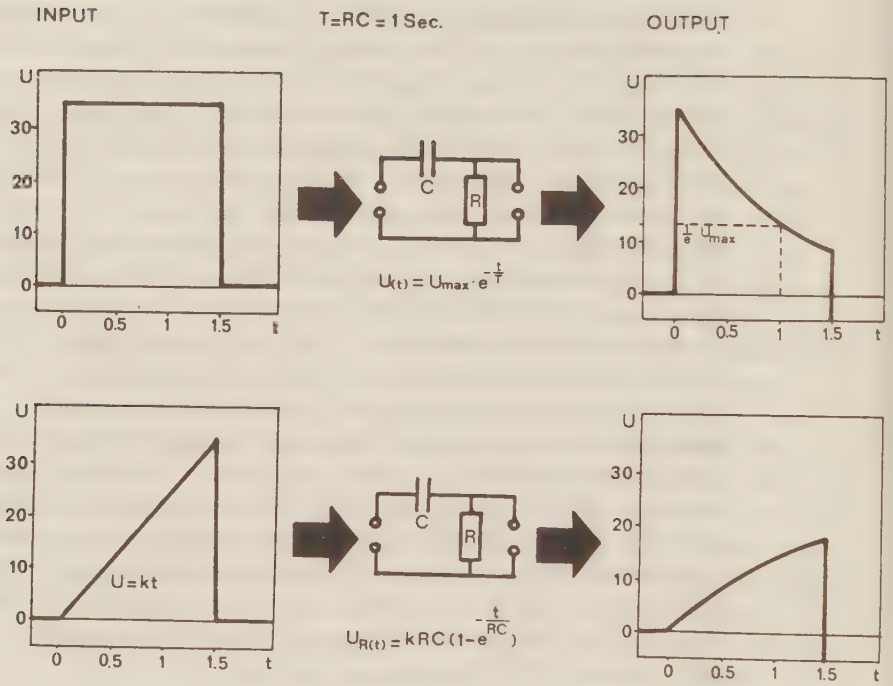

INPUT
T=RC = 1 Sec.
OUTPUT
U
30
20
10
0
0 0.5 1 1.5 t
C
R
$U_{(t)} = U_{max} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$
$\frac{1}{e} U_{max}$
U=kt
$U_{R(t)} = kRC(1-e^{-\frac{t}{RC}})$

Abb. 8

ERGEBNISSE

Bevor wir auf weitere Besonderheiten der elektrischen Aufzeichnung von Augenbewegungen eingehen, möchten wir die Verformung des in den Elektroden abgegriffenen Signals durch das Verstärkersystem am Beispiel des verwendeten Hellige-Gerätes beschreiben. Die Wechselstrom-Vorverstärker des Gerätes kann man vereinfacht als Kondensator-gekoppelte Verstärker mit einem parallelen, hochohmigen Eingangswiderstand beschreiben. (Abb. 8) Der Spannungsabfall am Widerstand R ist proportional dem Lade- bzw. Entladestrom des Kondensators C. Daraus geht schon hervor, daß hochfrequente Eingangsspannungen fast unverändert weitergegeben werden, während bei konstanter Eingangsspannung am Widerstand eine mit der Zeit exponentiell abfallende Spannung abgegriffen wird, die so gegen 0 geht, wie sich die Ladung am Kondensator dem Maximum nähert. Dieses Maximum wird bei großen Widerständen und/oder großen Kondensator-Kapazitäten natürlich langsamer erreicht. Die Zeit, in der die Spannung am Widerstand auf 1/e abfällt, hängt also von R und C ab. Sie heißt Zeitkonstante: T = RC. Die abgreifbare Spannung hängt außerdem von der Zeit ab: $U_{(t)}=U_{max}e^{-t/T}$. Da das Gerät aber die Ausgangsspannung dieses RC-Gliedes nicht unverändert aufzeichnet, sondern noch eine Vielzahl von signalmodulierenden Elementen enthält (Entladeglied, träges Schreibwerk etc.), können wir seine Charakteristik nur durch den Vergleich der geschriebenen Signale mit definierten Eingangssignalen abschätzen. Im Hinblick auf die sägezahnförmigen Eingangsspannungen der optokinetischen Eichnystagmen (langsame Phase plus schneller Rücksprung) interessieren also die Aufzeichnungen von sprunghaft ansteigenden Spannungen (schnelle Phase) verschiedener Amplituden sowie von linear ansteigenden bzw. abfallenden Spannungen (langsame Phase).

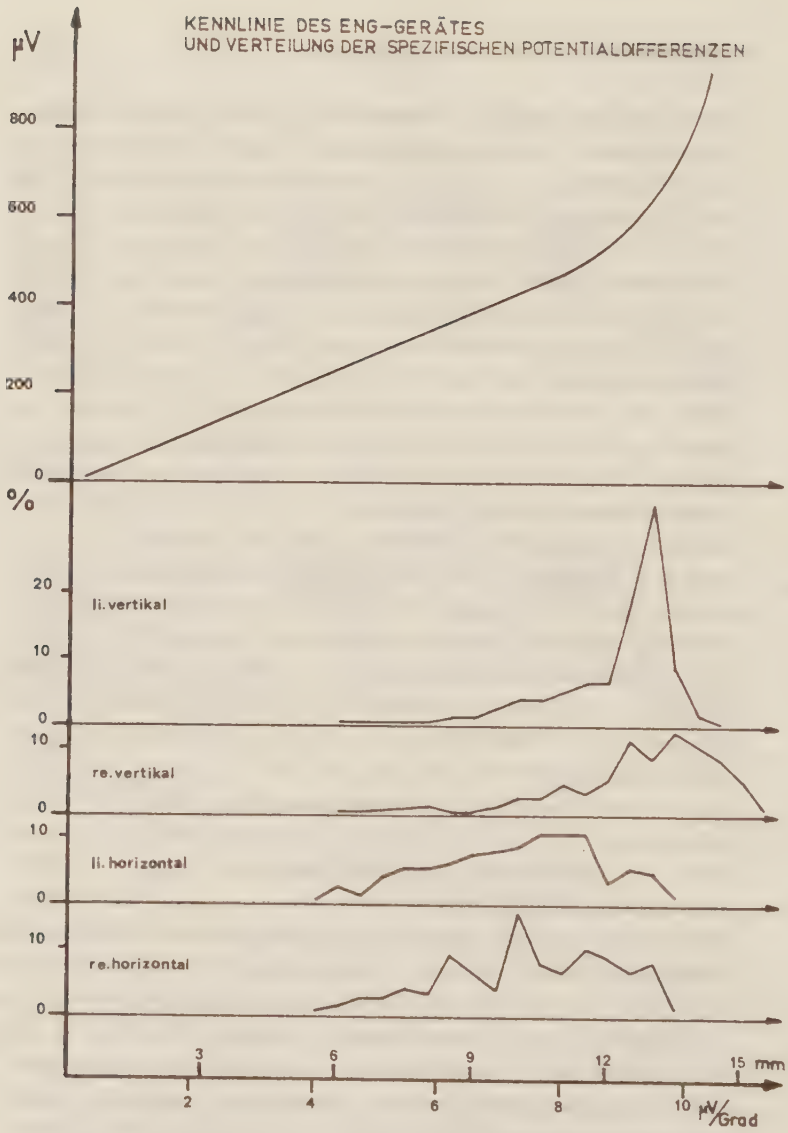

KENNLINIE DES ENG-GERÄTES
UND VERTEILUNG DER SPEZIFISCHEN POTENTIALDIFFERENZEN
µV
800
600
400
200
0
%
20
10
0
li. vertikal
re. vertikal
li. horizontal
re. horizontal
3
6
9
12
15 mm
2
4
6
8
10 µV/Grad

Abb. 9

In Abb. 9 , oben, haben wir die Höhe der maximalen (bei t=0) Zeigerausschläge (mm, Abszisse) bei Rechteck-Eingangsspannungen verschiedener Höhe (µV, Ordinate) aufgezeichnet. Wie vom RC-Glied her zu erwarten, besteht zunächst ein linearer Zusammenhang. Allerdings sind die Maximalausschläge ab etwa 600 uV deutlich zu klein. Im unteren Teil der Abbildung haben wir die Verteilungen (% in der Ordinate) der halben Amplituden der sägezahnförmigen Eichnystagmen aller 150 Probanden für jedes Auge und jede Richtung zum Vergleich eingezeichnet. Die Ausschläge werden bei Bulbusrotationen um jeweils 1/2x55,06 Grad registriert. Wie deutlich zu erkennen ist, fällt ein großer Teil der Ausschläge in den Bereich der nicht mehr linearen Aufzeichnung (Vgl. mit oberem Teil der Abb.), d.h. es werden im oberen Bereich zu kleine Ausschläge registriert. Hieraus erklärt sich unter anderem die Abweichung unserer mittleren spezifischen Potentialdifferenzen von dem bei CLAUSSEN dafür angegebenen Wert von (5)
12 µV/Grad.Zu bemerken ist aber,daß die Angabe einer bestimmten abgreifbaren Spannung pro Winkelgrad Augenbewegung,wie sie auch in der Dissertation von FRÖHLICH ge- (10)
macht wird,irreführend ist.Bei der Berechnung wird nämlich Proportionalität zwischen Zeigerausschlag und Bulbusrotation vorausgesetzt.Ausserdem wird das AC-bedingte elektrische Amplitudendefizit,das bei langsamen Bewegungen auftritt,nicht berücksichtigt.Je höher die Frequenz der verwendeten optokinetischen Eichnystagmen ist,um so höher wird der berechnete Wert ausfallen.(Über Eigenschaften des AC-Verstärkers siehe unten).Jedenfalls sind solche Angaben,sofern sie sich auf die AC-Verstärkertechnik stützen,nicht untereinander vergleichbar, wenn nicht exakt identische Versuchsbedingungen vorlagen.In Abb. 9,unten,fallen ferner die rechtsschiefen Verteilungen der Höhen der halben Eichamplituden auf. Dies mag ebenfalls an der relativ zu niedrigen Aufzeich-

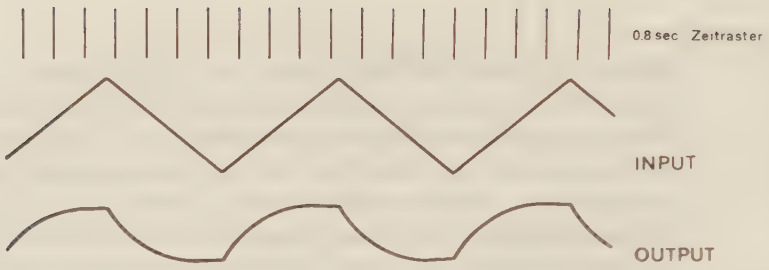
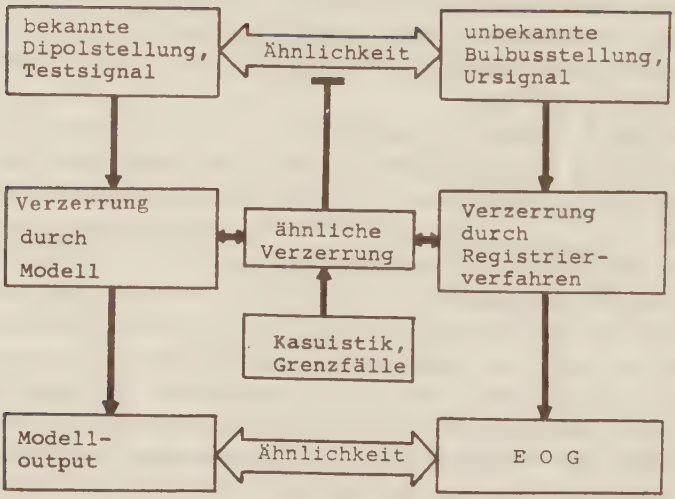


Abb.10

Abb.11

nung aller höheren Elektrodenspannungen liegen,wodurch der rechte Teil einer Normalverteilungskurve gedrückt bzw. abgeschnitten wurde.Deshalb wird die Rechtsbetonung auch bei den oberen beiden (links u. rechts vertikal),durchschnittlich im höheren Bereich liegenden Kurven deutlicher.

In Abb.8 haben wir aufgezeichnet,wie eine linear ansteigende Eingangsspannung ($U=k\cdot t$) am Widerstand des RC-Gliedes abgegriffen wird.Die Ausgangsspannung ergibt sich als $U_R = k\cdot R\cdot C\cdot(1-e^{-t/RC})$.Daraus folgt,daß für der Zeitkonstante gegenüber sehr große Zeiten ($t \gg RC$) die Ausgangsspannung $U_R=k\cdot R\cdot C$ wird,also ein Plateau ergibt.Für sehr kleine Zeiten ($t \ll RC$) geht U_R gegen $kt=U$ dh. es wird die Eingangsspannung abgegriffen.Wir haben über einen speziellen Spannungsgenerator dreiecksförmige Spannungen verschiedener Frequenz auf den Geräteeingang gelegt.Abb.10 zeigt die dabei entstandenen Aufzeichnungen.Sie entsprechen dem Verlauf von U_R,wie wir ihn berechnet hatten.Allerdings zeigte sich,daß das Plateau nicht gehalten wird,sondern über eine Entladestufe wieder auf die O-Stellung des Zeigers zurückgeführt wird. Die Entladung erfolgt aber mit einer wesentlich größeren Zeitkonstante.Wir konnten sie sichtbar machen,indem wir mit verkleinerten Zeitkonstanten aufzeichneten. (Abb.11) Diese Nullinienrückführung spielt bei der Signalverzerrung nur eine unwesentliche Rolle,aber wir erwähnen sie,weil sie zur elektrischen Zentrierung unseres Koordinatensystems beiträgt.Wir können die Eigenschaften des Gerätes ,wie sie auch aus Abb.8-11 hervorgehen,zusammenfassend so beschreiben: Bei sehr schnellen Spannungsänderungen erfolgt die Aufzeichnung in gewissen Grenzen linear proportional,bei langsamen elektrischen Vorgängen wird aber nicht der Spannungsverlauf, sondern seine Änderungen wiedergegeben.Im Falle unserer Dreiecksspannung hält sich der Zeiger nach einer Zeit auf einem Plateau,zeigt also eine konstante Änderung des Eingangssignals an,während der Anstieg zu Beginn proportional wiedergegeben wurde.


bekannte Dipolstellung, Testsignal
Ähnlichkeit
unbekannte Bulbusstellung, Ursignal
Verzerrung durch Modell
ähnliche Verzerrung
Verzerrung durch Registrier-verfahren
Kasuistik, Grenzfälle
Modell-output
Ähnlichkeit
E O G

MODELLVERSUCHE :

Die technischen Untersuchungsbedingungen in der Elektro-okulografie lassen sich besonders gut in einem Modell nachahmen.Die interessierende Größe,nämlich die Bulbus-stellung,kann in unserem Modell exakt vorgewählt wer-den.Sie ist aber in der Elektro-Okulografie nur in sel-tenen Fällen,etwa bei einfachen monokulären Augenfolge-bewegungen bei zuverlässigen Versuchspersonen bekannt. Wenn die Verzerrung dieses Ur-Signals bei Ableitung vom Probanden in gleicher Weise erfolgt wie am Modell,dann ist das Modell brauchbar.Dann kann aber auch innerhalb des wirklichkeitsgetreuen Arbeitsbereichs des Modells eine Test-Information vorgegeben werden und bei Über-einstimmung des Modell-outputs mit einer wirklichen EOG-Aufzeichnung auf das dieser zugrundeliegende oku-läre Bewegungsmuster geschlossen werden.
Wir verwendeten in unseren Modellen ein elektrisch lei-tendes Papier (PASCO-SCIENTIFIC),wie es zur Analyse komplizierter elektrischer Felder benutzt wird.Abwei-chend von den wirklichen Versuchsbedingungen war der Kopf hier ein homogener,zweidimensionaler elektrischer Leiter.In Analogie zu den ENG-Elektroden haben wir massive Metallelektroden verwendet,die mit ihrer ca. 1/2 cm^2 großen Grundfläche fest auf das Papier gedrückt wurden,und zwar immer am Rand,entsprechend der Hautober-fläche,die ja auch die Grenzfläche des elektrischen Mediums ist.Zur Spannungsmessung zwischen den Elektro-den verwendeten wir Voltmeter mit Innenwiderständen von 100 MΩ.Die bei diesen Widerständen fließenden Strö-me sind so klein,daß ein elektrisches Feld nicht abge-schwächt wird oder zusammenbricht.Die Augenbulbi werden maßstabgerecht durch Kreise dargestellt,die auf das Pa-pier gezeichnet werden und eine Winkelgrad-Einteilung tragen.Das Vorzeichnen muß mit einem nicht-leitenden Schreibgerät geschehen,also mit Filzstift und nicht mit Bleistift,da sonst die elektrischen Dipole kurzgeschlossen

werden und das elektrische Feld verzerrt wird. 4 Elektroden wurden im Abstand der Kreisdurchmesser zu 2 Paaren montiert, die dann auf den Kreisen aufgesetzt wurden und den Augenbulbusdipol in jeder beliebigen Winkelstellung imitierten. Die Spannungen an den Elektrodenpaaren konnten unabhängig voneinander stufenlos reguliert werden. Wir haben die Dipolspannungen, die Elektrodenpositionen und bei binokulären Versuchen die Achsenstellung der Dipole zueinander variiert und in kleinen Testreihen die abzuleitenden Potentialdifferenzen in Abhängigkeit von der Dipolstellung aufgezeichnet. Die Ergebnisse wurden dann mit den elektro-okulographischen Aufzeichnungen an unseren Probanden verglichen.

Beim Arbeiten mit den Elektrodenpaaren fiel auf, daß sich kleine Quer- oder Längsverschiebungen des Dipols um einige mm in den Ableitpunkten nicht besonders störend bemerkbar machen, daß sich jedoch schon kleinste Drehungen in starken Schwankungen der Potentialdifferenzen niederschlagen. Die starke Abhängigkeit der Spannungen von der Meßgröße, also der Bulbusrotation führt zu einem guten Nutz/Störsignal-Verhältnis in der Elektro-Okulographie. Ungleichmäßige Abstände zwischen den angelegten Elektroden und den Augenbulbi stören also die winkelanaloge Aufzeichnung nur wenig. Eine stark verzerrte elektrische Wiedergabe des Ursignals (der Bulbusrotation) ist hingegen immer dann zu erwarten, wenn es zu unbeabsichtigten Verdrehungen der Verbindungsachse der beiden Ableitpunkte eines Elektrodenpaares kommt. In einem Elektrodenpaar können immer nur die Signale einer Bulbusbewegung aufgezeichnet werden, die senkrecht zur Verbindungslinie der beiden Elektroden verlaufen. Schräg verlaufende Bewegungen werden in einem Elektrodenpaar so aufgenommen, wie es der Projektion des Bewegungsumfanges auf die Elektrodenachse entspricht. Wenn um ein Auge herum 2 Elektrodenpaare so angeordnet sind, daß deren eine Verbindungsachse senkrecht, die andere waagrecht steht, dann werden Horizontal- und Vertikalbe-

wegungen immer nur über ein Paar registriert, da die Projektion auf eine Achse immer Null ist (Abb.12 A). Charakteristisch für jede Schrägbewegung ist hier die Projektion der beiden Komponenten auf 2 Verbindungsachsen. Wenn sich aber beide Elektrodenachsen nicht senkrecht schneiden, projeziert sich z.B. eine Vertikalbewegung auf 2 Achsen. Wird das Signal von der schrägen Achse als Horizontalbewegung interprätiert - wie es mit unserer Auftragung im kartesischen Koordinatensystem der Fall ist - erhält die reine Vertikalbewegung eine scheinbare horizontale Komponente und wird im CVG als schräge Bewegung aufgezeichnet. (Abb.12 B). Die Horizontalbewegung wird, wie aus der Abbildung ersichtlich ist, ralativ verkleinert aufgezeichnet.

Am leichtesten fällt der Vergleich zwischen wirklichen elektro-okulographischen Aufzeichnungen und den Ergebnissen der Modelle, wenn es sich um einfache, definierte Bewegungsmuster handelt, wie sie bei allen Versuchspersonen beim Eichen aufgezeichnet worden waren. Die sägezahnförmigen optokinetischen Nystagmen, die wir beim Eichen durch einen linear mit konstanter Geschwindigkeit laufenden Stimulus induzierten, sind Aufzeichnungen der Spannungen gegen die Zeit. Der Rotationswinkel des Dipols (=Bulbus) steht dabei in einer arc-tan-Beziehung zur linearen Zeitskala. Wir haben unsere an den Elektroden abgegriffenen Spannungswerte aus den Modellversuchen gegen den Rotationswinkel des Dipols aufgetragen. Die Winkelgradskala auf der Abszisse ist aber im Gegensatz zu den EOG-Aufzeichnungen hier linear. Der Vergleich der optokinetischen Nystagmen mit den "Modell-Nystagmen" ist gut möglich, denn die Linearitätsabweichung der Zeitachse bei den Modellnystagmen beträgt maximal 7 %.

Wir haben insgesmt 3 verschiedene Ableitbedingungen untersucht, die den wirklichen anatomischen Verhältnissen nachgebildet waren:

Potentialänderungen an 2 Elektroden bei Rotation eines Dipols:

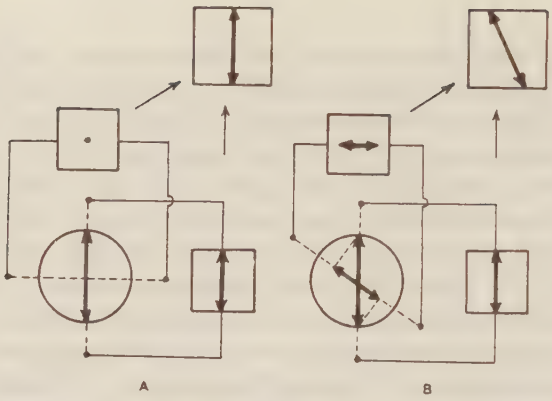


Abb.12

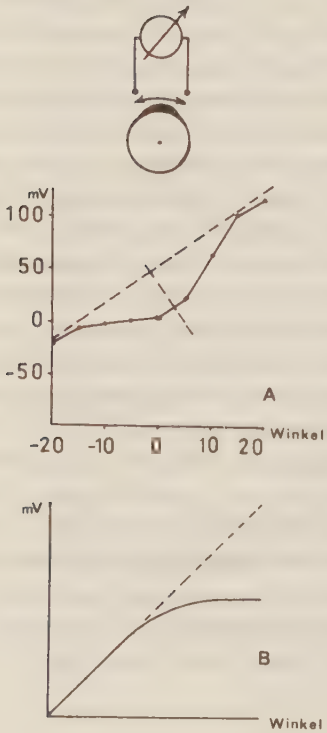


Abb.13

Hier haben wir einen an der Grenzfläche eines elektrischen Mediums rotierenden Dipol nachgebildet und die Potentialdifferenzen an 2 Elektroden abgegriffen,die beide in gleichem Abstand vom Drehpunkt des Dipols ebenfalls an der Grenzfläche (Grenzlinie)des Mediums lagen.Dies entspricht der Lage des Vertikal-Elektrodenpaares an einem Auge (Sagittalschnitt) oder auch des Horizontalpaares bei monokulärer Ableitung (Horizontalschnitt). (Abb.13 oben).Die Stellung 0 Grad (Abszisse) soll die Stellung sein,bei der die Dipolachse die Elektrodenverbindungslinie rechtwinklig schneidet,im übertragenen Sinn also der Blick geradeaus.In dieser Stellung ist die Potentialdifferenz gleich 0,denn die Elektroden sind beide sowohl vom vorderen positiven wie vom hinteren negativen Pol gleich weit entfernt.Bei Abweichung des Dipols gegen den Uhrzeigersinn (neg. Winkel) oder mit dem Uhr-

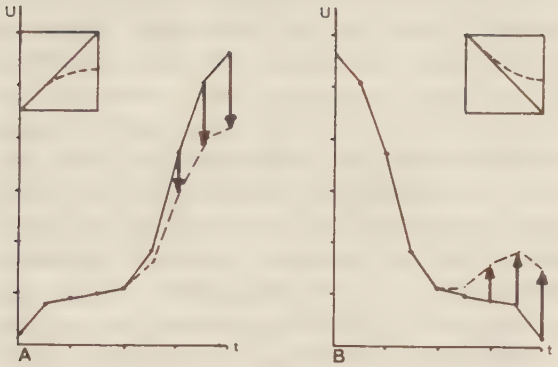


Abb.14

zeigersinn (pos. Winkel) ergibt sich kein linearer,durch den 0-Punkt gehender Anstieg der Potentialdifferenzen,sondern eine auf eine ansteigende Gerade aufgesetzte gebogene Kennlinie.Die mathematische Beschreibung der Kennlinie ist schwierig und muß das quadratische Abstandsgesetz für die elektrische Feldstärke und die nichtlineare Annäherung beider Pole an die Elektroden berücksichtigen.Die Kurve ist leicht reproduzierbar und wir stellen folgendes fest :
1) Trotz symmetrischer Anordnung der Elektroden finden wir in der Drehrichtung,bei der sich der positive vordere Pol der Elektrode des positiven Geräteeinganges nähert,geringere Änderungen der Potentialdifferenz pro Winkelgrad als bei den jenseits der 0-Stellung liegenden Dipolstellungen.
2) Die Kennlinie nähert sich immer mehr einer Geraden,je größer die Elektrodenabstände gegenüber der Dipollänge werden.
Wollen wir dieses Verhalten an den wirklichen elektro-okulo-

graphischen Aufzeichnungen nachprüfen, müssen wir noch die Signalverzerrung durch den Wechselstromverstärker berücksichtigen. Wir haben dies in Abb.14 grob schematisch getan. Links ist der Potentialverlauf bei Dipolrotation im Uhrzeigersinn aufgezeichnet,rechts bei einer Rotation gegen den Uhrzeigersinn bei gleicher Elektrodenpolung,außerdem die AC-Verzerrungen eines Dreieckssignals und die der beiden Kennlinien. Die Krümmungen sind im Vergleich zur Wirklichkeit stark übertrieben. Man erkennt, daß die gerätebedingte Signalveränderung bei Rotation in einer Richtung im Sinne einer Linearisierung des Signals wirkt, in der anderen Richtung aber in dem einer Verkrümmung des Signals. Bei unseren optokinetischen Eichnystagmen müßten sich also die Aufzeichnungen der Bewegung von unten nach oben von denen der Bewegung von oben nach unten durch verschieden starke Krümmungen der Dreieckshypothenusen unterscheiden. Die Elektroden liegen aber am Patienten relativ weiter auseinander, so daß sich die Krümmung nicht allzu stark bemerkbar machen wird. Abb.15 zeigt als Beispiel die Aufzeichnungen des linken Auges der ersten 5 Probanden bei vertikalem Stimulusverlauf. Die Bewegungen von unten nach oben sind in durchgezogenen Linien aufgezeichnet. Zum Vergleich haben wir die Aufzeichnungen der langsamen Phase der Bewegung von oben nach unten mit unterbrochenen Linien eingetragen. Ihr Verlauf ist hier so, als wäre das Papier bei ihrer Registrierung in entgegengesetzter Richtung gelaufen. Wir führen diesen sehr diskreten Befund nicht an, weil er in der Elektro-okulographie besonders berücksichtigt werden müßte, sondern als Beispiel für gute Übereinstimmung der Modelleigenschaften mit den wirklichen Ableitbedingungen.

Binokuläres Modell mit 3 Elektroden
und 2 Dipolen:

Die Überlagerungen der elektrischen Felder und die in den Elektroden abgreifbare Spannung in Abhängigkeit von der Winkelstellung der Dipole ist theoretisch so gut wie nicht abschätzbar, insbesondere wenn die Dipole nicht gleichmäßig

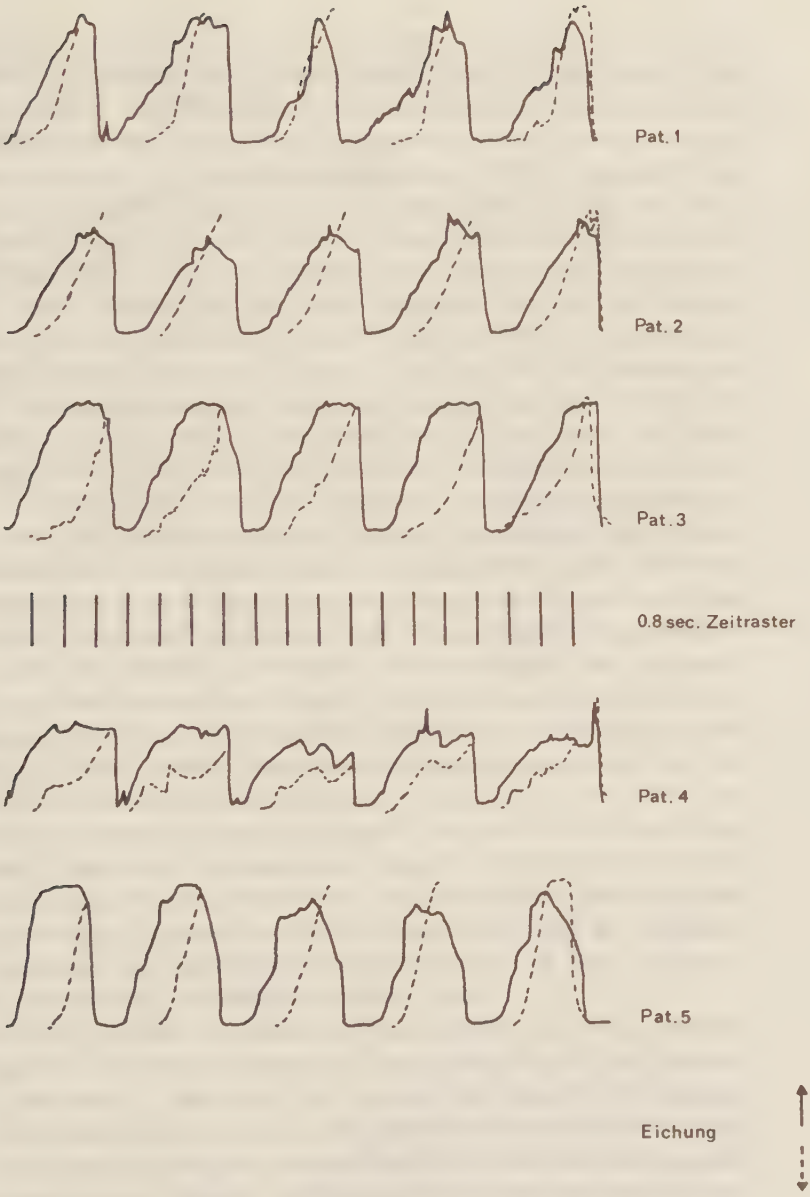


Abb.15

stark sind oder nicht parallel liegen. Wir haben deshalb ein Modell mit 2 Dipolen untersucht, bei dem wir mit dem Papier einen Horizontalschnitt durch den Kopf in Höhe der Augen nachgebildet haben. Die 3 Elektroden der Horizontalableitungen wurden in den entsprechenden Positionen am Rand plaziert und mit den Meßgeräten verbunden (Abb.16). Die Augenbulbi wurden maßstabgerecht als Kreise mit Gradeinteilungen gezeichnet,auf die die beiden Elektrodenpaare aufgesetzt wurden. Zunächst haben wir untersucht, wie stark das Feld eines Auges in die gegenüberliegende Seite ausstrahlt und wie es dort registriert wird. Deshalb haben wir den linken Dipol, auf dem eine Gleichspannung von 30 V lag, auf dem Kreis in verschiedener Winkelstellung aufgesetzt und den rechten weggelassen. Abb.17 zeigt die abgegriffenen Spannungen in Abhängigkeit vom Dipolwinkel. Gleichzeitig sind die Signale eingezeichnet wie sie vom AC-Verstärker wiedergegeben worden wären. Die Aufzeichnungen auf der Seite ohne Dipol sind erstaunlich hoch und zeigen einen umgekehren Verlauf. Hier wird also ein Dipol vorgetäuscht, der eine umgekehrte Rotation ausführt wie der tatsächlich vorhandene. Der Grund liegt in der Polung der beiden Meßgeräte, bei denen die mittlere Elektrode ebenso wie bei der Aufzeichnung am Patienten einmal am positiven, auf der anderen Seite aber am negativen Eingang liegt. Höhere Positivität in der Mittelelektrode wird nämlich bei 2 vorhandenen Dipolen durch Rotation des einen nach links und des anderen nach rechts verursacht. Die Polung wurde so gewählt, um bei binokulärer Parallelbewegung in gleicher Richtung auch 2 gleichgerichtete Ausschläge zu erhalten.

Unter unseren Probanden befand sich ein Patient, dem das rechte Auge mitsamt den Muskeln entfernt worden war. Das zweite Auge war normalsichtig und zeigte normale Motilität. Im unteren Teil der Abb.17 sind die Original-Elektro-okulogramme von den 3 Horizontalelektroden bei horizontaler Blickfolgebewegung abgebildet. Die Aufzeichnungen von der Umgebung der leeren rechten Orbita zeigen im Vergleich zu denen der anderen Seite in guter

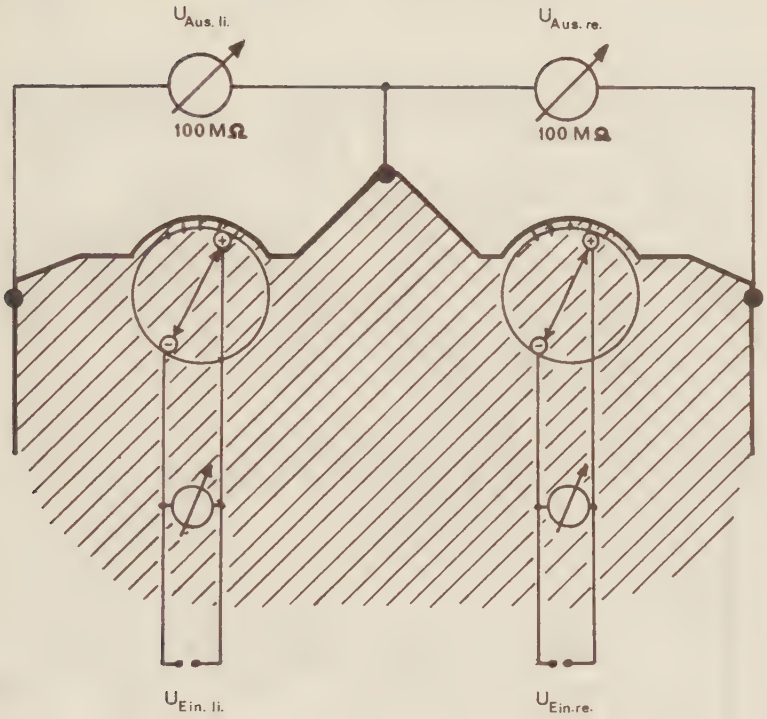


Abb.16

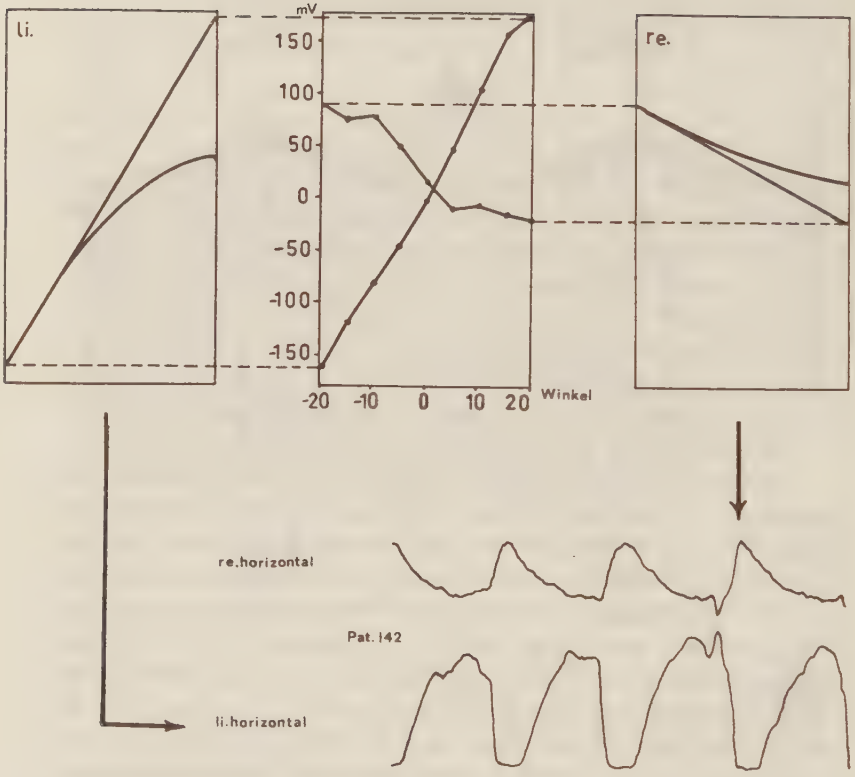

li.
mV
150
100
50
0
-50
-100
-150
-20
-10
0
10
20
Winkel
re.
re.horizontal
Pat. I42
li.horizontal

Abb.17

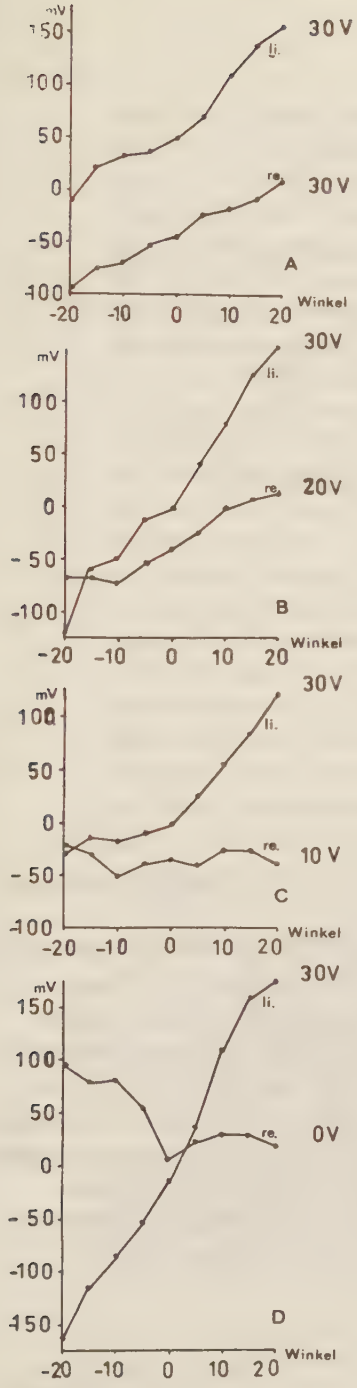


Abb.18

Übereinstimmung mit den Modellergebnissen geringere Amplituden und entgegengesetzte Schlagrichtung.Wir stellen also fest,daß das Feld einer Seite die Ableitungen von der gegenüberliegenden Seite stark beeinflußt,indem dort gegenschlägige Dipolrotationen vorgetäuscht werden.Wenn auf beiden Seiten Dipole gleicher Stärke parallel rotieren,müssen sich also in diesem Ableitungssystem beide Felder im Sinne einer gegenseitigen Schwächung überlagern. Die beiden Potentialdifferenzen pro Winkelgrad Rotation zwischen den 3 Horizontalelektroden sind dann geringer als bei der Ableitung von einem Auge bei fehlendem gegenüberliegendem Bulbus. Wir halten dies für die Ursache dafür, daß in den Horizontalableitungen grundsätzlich niedrigere Potentialdifferenzen ableitbar sind als in den Vertikalelektroden.Die Unterschiede sind größer als es durch die Differenzen der Elektroden-Haut-Widerstände zwischen Vertikal- und Horizontalableitungen zu erklären wäre.

Besonders interessant ist das Ausmaß der gegenseitigen Beeinflussung,wenn beide Dipole,wie häufig in der Praxis der Fall, nicht gleich stark sind oder nicht immer parallel zueinander stehen.Es ist natürlich unmöglich,dies am Patienten zu ermitteln.Wir haben in unserem binokularen Horizontalmodell die Stärke des einen Dipols variiert.Beide Dipole standen immer parallel.Diese Versuche haben,wie aus den oben beschriebenen Vergleichen der Modellergebnisse mit den EOG-Aufzeichnungen her-

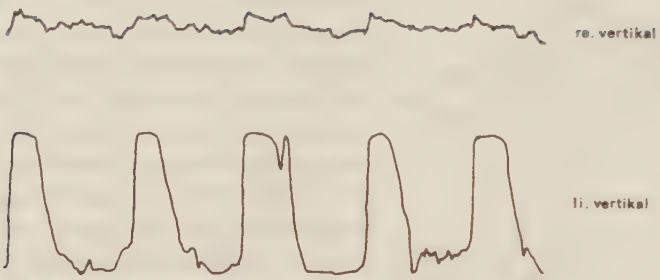


Abb.19

vorgeht,eine hohe Aussagekraft über die tatsächlichen Verhältnisse am Menschen.
In Abb.18 sind die Spannungsänderungen an den Elektroden bei paralleler Rotation zweier Dipole aufgezeichnet. Dabei wurde von oben nach unten,die Spannung des einen Dipols immer weiter verringert, während die des anderen konstant auf 30 V blieb. Es wird deutlich,daß auf einer Seite die Potentialdifferenzen pro Winkelgrad (=Steigung der Graphen) nicht nur von der absoluten Stärke des entsprechenden Dipols abhängt, sondern auch vom Verhältnis der beiden Dipole zueinander. Wie erwartet, nimmt die Steigung der Kennlinie des li. Dipols zu, je schwächer der re. Dipol wird.

Umgekehrt nimmt diese Steigung für die rechte Seite ab, je größer der Spannungsunterschied der Dipole untereinander wird und wird schließlich sogar negativ. Die Steigung nimmt stärker ab als die absolute Stärke des Dipols. In der Elektro-Okulographie kommt es wegen der genannten Polung nur in den Horizontalableitungen zu dieser gegenseitigen Schwächung, während die Ausstrahlung eines Feldes in die gegenüberliegenden Vertikalableitungen dort nur sehr geringe gleichgerichtete Elektrodenspannungen verursachen. Dies wird am Beispiel des einäugigen Patienten bei der vertikalen Blickfolgebewegung deutlich (Abb.19).
Wir haben im Modell noch den Fall nachgeahmt, daß beide Dipole nicht immer parallel stehen. Abb.20 oben zeigt den Spannungsverlauf, der sich bei 2 Dipolen ergibt, die ständig in 10 Grad Konvergenzstellung zueinander stehen. In der Abszisse ist der Winkel des "Zyklopenauges" angegeben, die Werte für den linken Dipol liegen jeweils um 5 Grad darüber, die für den rechten um 5 Grad darunter. Neben den höheren Spannungsanstiegen pro Winkelgrad gegenüber denen bei Parallelbewegung (Abb.18 A) fallen die Niveauunterschiede beider Kurver auf. In Abb.20 unten ist eine gegenschlägige Dipolrotation aufgezeichnet. Die Amplituden beider Kurven sind ebenfalls höher als bei binokulärer Parallelrotation. Beide Horizontalableitungen ergeben gleichzeitig Null Volt bei beidseitiger Außenrotation von etwa 10 Grad (= +10 Grad für re. Auge und -10 Grad für li. Auge), d.h. also bei 20 Grad Divergenzstellung. Dagegen ergeben sich im Modell zwischen rechtem und linkem Elektrodenpaar um ca. 100 mV unterschiedliche Potentialdifferenzen wenn beide Dipole parallel in 0^{o}-Stellung liegen. Dies ist auch in Abb. 18 A zu erkennen.

Wir haben auch versucht, Potentialänderungen an den Horizontalelektroden eines Auges bei Vertikalbewegungen modellhaft zu untersuchen:
Die mittlere Elektrode wird normalerweise auf der Nasenwurzel angebracht während man sich bei den temporalen

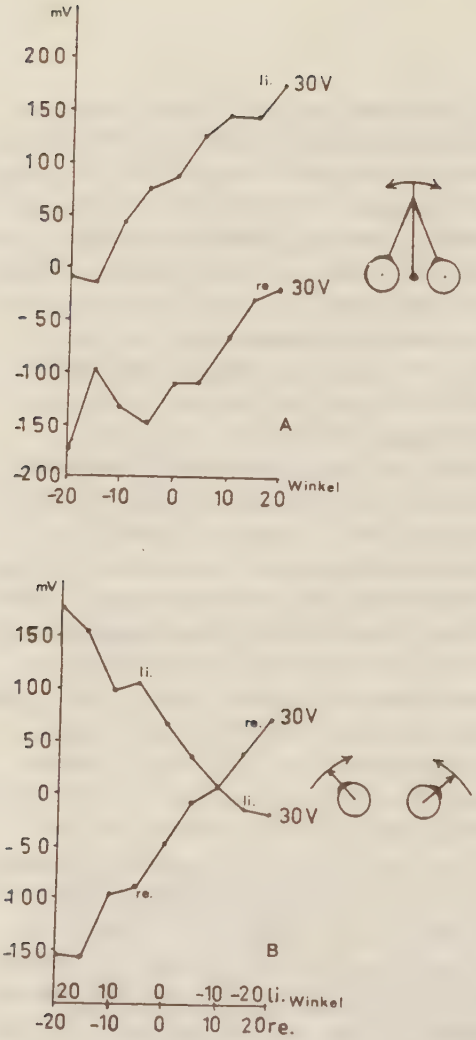

mV
200
150
100
50
0
- 50
-100
-150
-200
li. 30V
re. 30V
A
-20 -10 0 10 20 Winkel
mV
150
100
50
0
- 50
-100
-150
li.
re. 30V
li. 30V
re.
B
20 10 0 -10 -20 li. Winkel
-20 -10 0 10 20 re.

Abb.20

Elektroden an den äußeren Lidwinkeln orientiert. Die anatomischen Verhältnisse sind aber bei den meisten Menschen so, daß dabei die mittlere Elektrode nicht mit den Temporalelektroden in einer Horizontalebene zu liegen kommt, sondern 1 bis 1,5 cm darüber. Die nasale Ableitung erfolgt also vor und über der temporalen. Die Verbindungslinie der Nasal- und Temporalelektrode ist also nicht nur nicht-parallel zur Drehachse des Bulbus bei Vertikalbewegungen, sondern liegt auch nicht mit ihr in einer Ebene. Die in unserem elektrischen Feldmodell untersuchten Bulbusrotationen können nur um eine zum Papier senkrecht stehende Achse erfolgen. Daraus ergibt sich, daß wir die nasale und temporale Elektrode gemeinsam in eine Sagittalebene projezieren müssen. Dies ist insofern berechtigt, als bei Rotation um die horizontale Querachse in der Ebene, die durch die Drehachse und die Dipolachse bestimmt ist, völlig symmetrische Felder bestehen und es also gleichgültig ist, ob in dieser Ebene 2 Punkte rechts und links des Dipols betrachtet werden, oder ob diese auf der gleichen Seite liegen. Abb.21 A, zeigt die Projektion der Elektroden und des Bulbus auf eine Sagittalebene. Wenn nasale und temporale Elektrode in einer gemeinsamen Horizontalebene wären, lägen sie bei jeder Vertikalbewegung auf Isopotetiallinien, obwohl sie in der Sagittalprojektion noch einen großen Abstand hätten. Dieser Abstand ist aber nur durch die Vorwölbung der Nasenwurzel gegenüber der zurückweichenden Schläfe bedingt. Diesen Konturen paßt sich das elektrische Feld aber so an, daß sich die Elektroden so verhalten, als lägen sie in einer gemeinsamen Frontalebene. Die Gesichtskonturen sind also eine wellig gewordene Frontalenbene, der das E-Feld in die Ausstülpungen folgt.

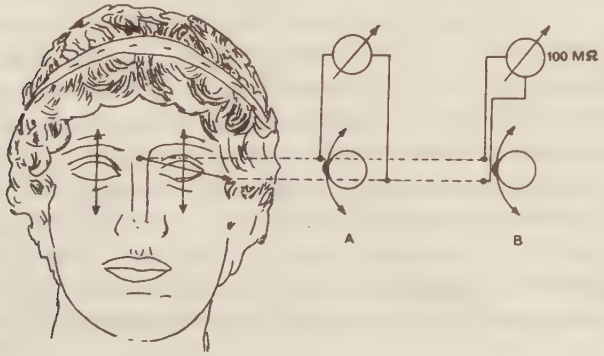
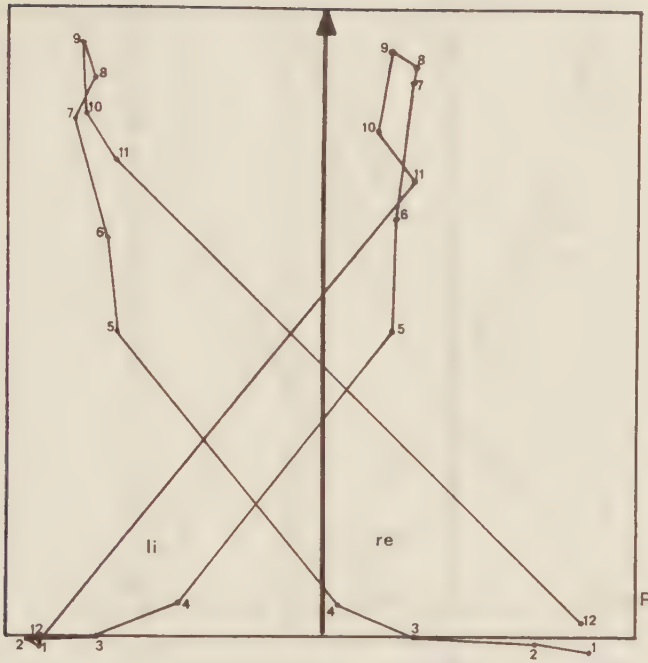


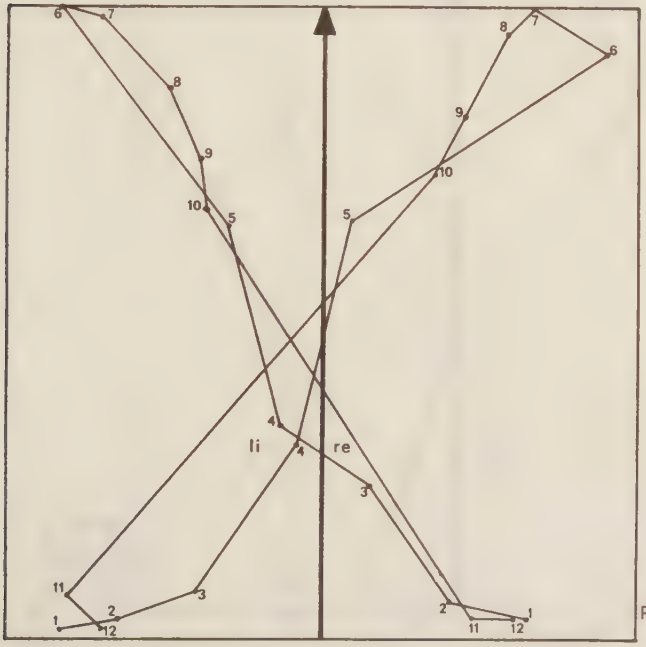
Abb.21

Diese Verhältnisse mußten wir in dem Modell durch Verlegen beider Elektroden an die Grenzfläche des Mediums (dies entspricht der Gesichtshaut) berücksichtigen (Abb.21 B). Wenn jetzt beide Elektroden in einer Horizontalebene lägen, fielen sie im Modell aufeinander: in der Horizontalableitung wäre dann bei Vertikalbewegung die Potentialdifferenz konstant Null. Einzige größere Abstraktion gegenüber der Realität ist hier nur die Annahme eines homogenen elektrischen Mediums. Abb. 21 zeigt die beschriebenen Verhältnisse in sagittaler und frontaler Projektion. Rechts daneben unsere Modellanordnung. Die linke (nasale) Elektrode lag am linken Rand des leitenden Papiers. Die abgegriffenen Spannungen haben wir dann gegen die Dipolrotation (Winkelgrad) aufgetragen. Unser Graph (Spannung/Winkelgrad) ist also unsere modellhafte elektro-okulographische Aufzeichnung von den horizontalen Elektroden bei der Vertikalbewegung. Als Ableitung von den im Modell fehlenden vertikalen Elektroden (Stirn/Wange) haben wir eine sich linear mit dem Bulbuswinkel (übertragen auf das EOG : linear mit der Zeit) ändernde Spannung angenommen. Aus beiden Spannungsverläufen haben wir, wie vorher schon aus den optokinetischen Eichnystagmen, in einem Koordinatensystem den Weg des Fixationspunktes bei vertikalem Eye-tracking zusammengesetzt, wie er sich aus unserem Modell ergibt. Dieses Bild haben wir mit denen aus den wirklichen Eichokulogrammen verglichen. Es ergab sich, wie erwartet im Modell als Spur des Fixationspunktes eine schräge Linie von unten außen (in Abb. 21B entspricht die untere Elektrode der Temporalelektrode) nach oben innen. Die "Bulbusrotation" erfolgte aber von unten nach oben.

Bei den Blickfolgebwegungen in vertikaler Richtung,die wir als biologische Eichung verwendeten, beobachteten wir bei 95 % unserer Probanden deutliche gegenschlägige Signale in den beiden Horizontalspuren. Diese Gegenschläge traten streng synchron mit den sägezahnförmitgen Aufzeichnungen in den Vertikalspuren auf .Sie waren bei Aufwärtsbewegungen konvergent, bei Abwärtsbewegungen divergent.Das Ausmessen aller 4 Spuren in einem feinen Zeitraster von 0,27 sec. und die Synthese der Punkte im Koordinatensystem in der oben beschriebenen Weise ergab

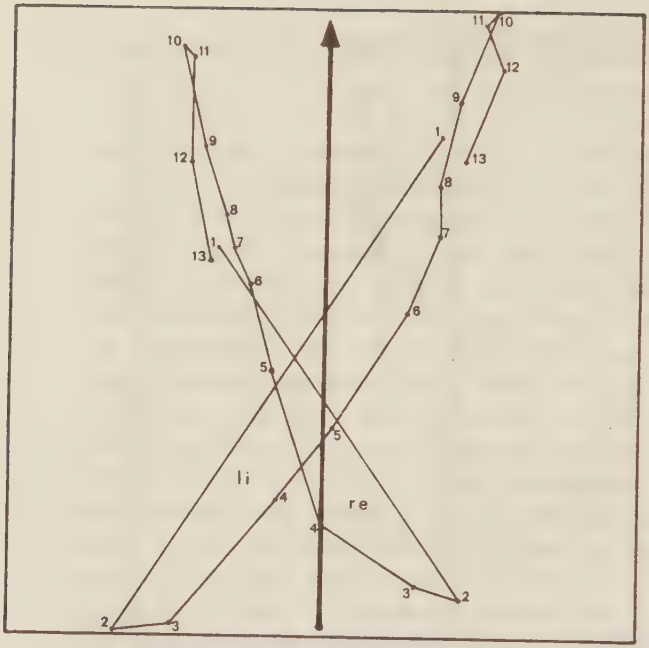


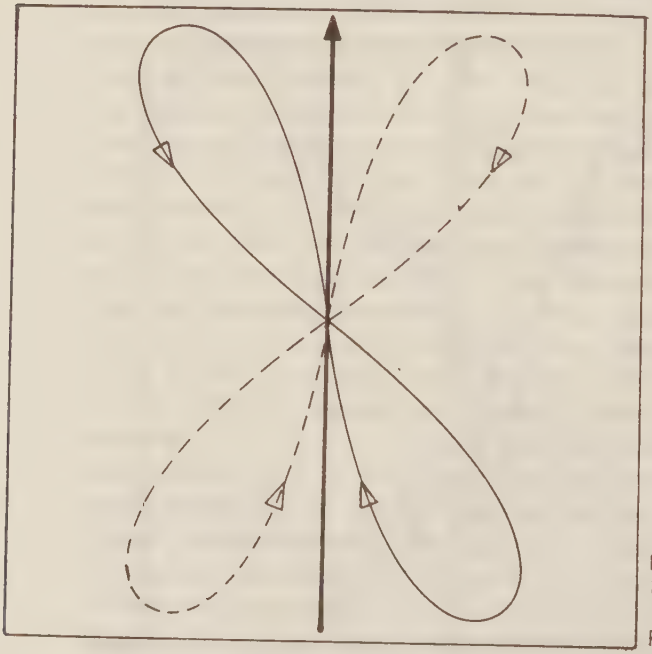
Pat.107



Pat.139

Abb.22

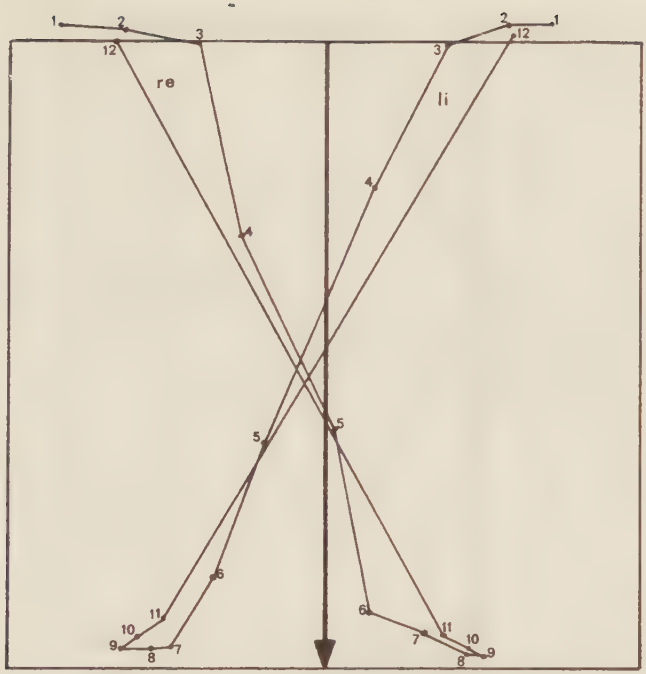




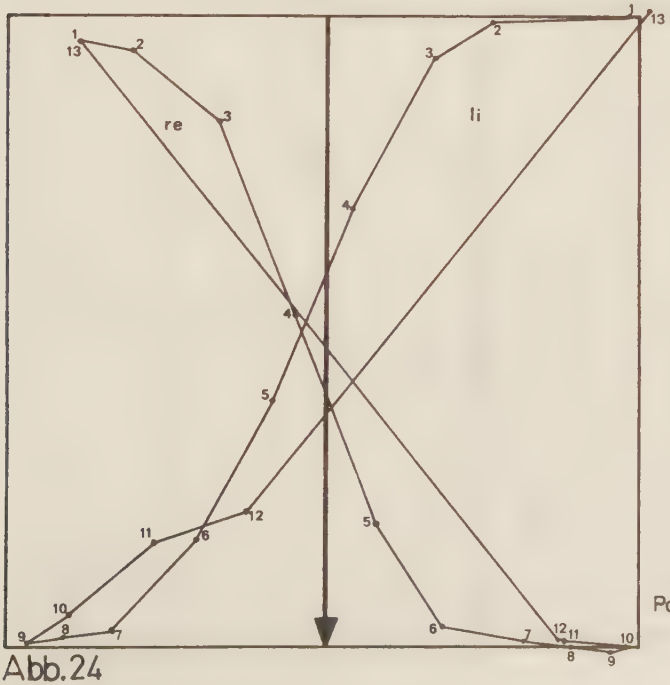
RE. AUGE ——
LI. AUGE ----

Pat. 150

Abb. 23

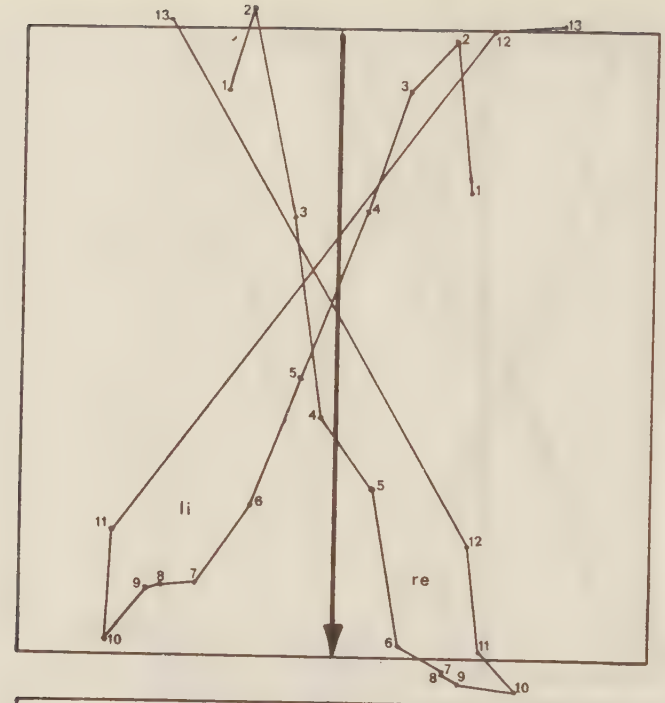


Pat.140



Pat.107

Abb.24



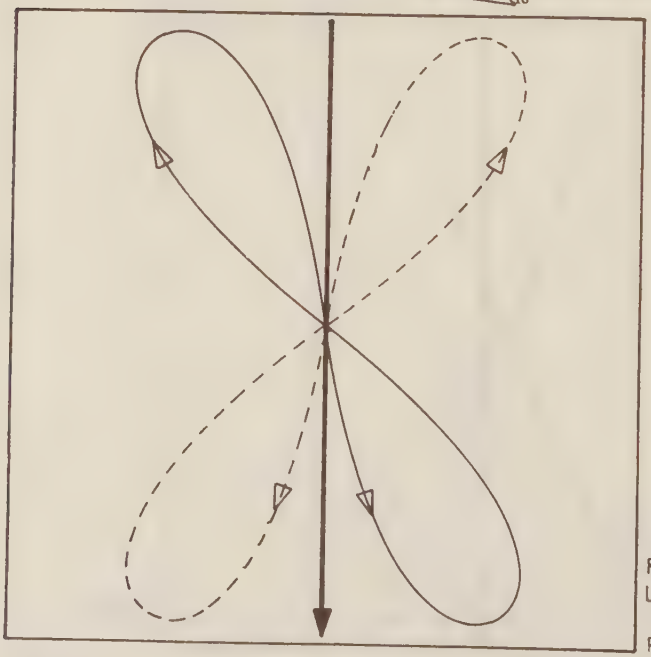
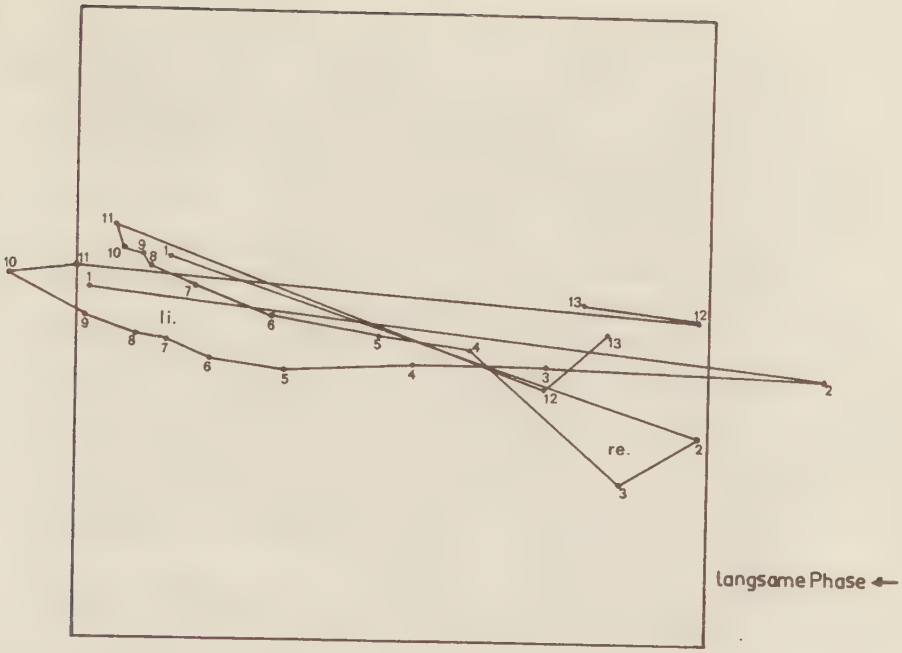
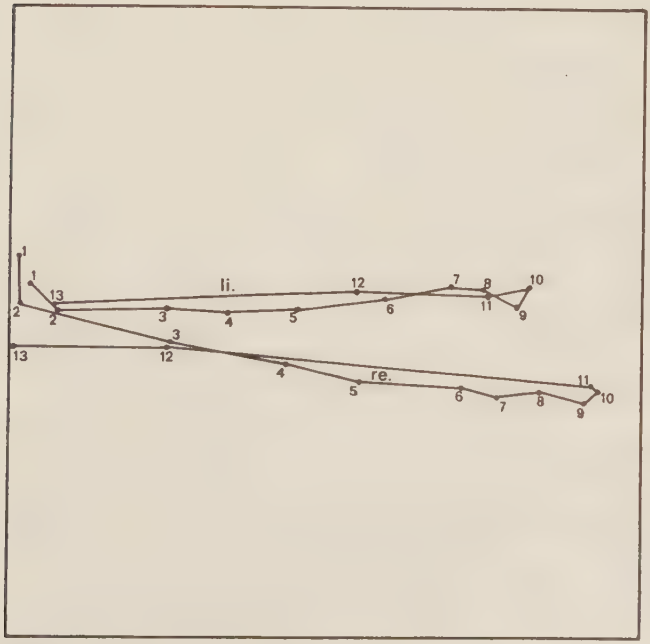


Abb.25





Pat.150

Abb.26

bei Vertikalbewegungen die in Abb. 22-25 abgebildeten "Blickfolgespuren" für rechtes und linkes Auge.Der dick eingezeichnete Pfeil zeigt Position und Richtung der langsamen Stimulusphase an.Wir konnten regelmäßig folgende Gesetzmäßigkeiten feststellen :

1) Die Wege der Fixationspunkte kreuzen sich in der senkrechten Mittellinie zwischen beiden Augen.

2) Bewegung nach oben ist mit Innenrotation verbunden, Abwärtsbewegung mit Außenrotation.

3)Die Aufzeichnungen der langsamen und schnellen Phase decken sich nicht,sondern die der langsamen Phase liegt dichter am zurückgelegten Weg des Stimulus,während die der schnellen Phase stärker davon abweicht.Es ergibt sich also eine 8-förmige Bewegung für jedes Auge,wie sie in der Abb.23 dargestellt ist.Läuft der Stimulus in die andere Richtung,kehrt sich die Richtung um,in der die 8 scheinbar abgefahren wird.(Abb.25)

Aufzeichnungen der Horizontalen Eichbewegungen ergaben die unauffälligen Bilder aus Abb.26.

Nach der oben erwähnten höheren Lage der Mittelelektrode gegenüber den Temporalelektroden und ihren aus dem Modell bekannten Konsequenzen auf die Horizontalableitungen liegt der Verdacht nahe,daß es sich bei den Horizontaldissoziationen um Artefakte handelt.Die scheinbare Zusammensetzung der Bewegungen eines Auges aus einem steileren und einem schräger verlaufendem Schenkel führen wir auf die Signalverzerrung durch den AC-Verstärker zurück.Die durch die schräge Elektrodenlage bedingte elektrische Horizontalkomponente wird bei der Aufzeichnung um so mehr abgeschwächt,je länger sie andauert.Die schnellere Bewegungsphase zeigt deshalb mit der weniger verzerrten,hohen Horizontalkomponente die schräger verlaufende Spur .

Es bietet sich an,den Verdacht auf Artefakte durch Vergleich der elektrischen Aufzeichnunggen mit Befunden aus einer anderen Methode zu erhärten.Wir haben Augenbewegungen beim Verfolgen eines vertikal laufenden Stimulus bei 5 helläugigen,vorher bereits elektro-okulographisch untersuchten Probanden mit 18 Bildern/sec. gefilmt.Die Bulbusrotationen erfolgten um den üblichen Eichwinkel von 55,06 Grad.Die Bilder der Filme wurden

nacheinander einzeln auf einen Schirm projeziert. Die Pupillen, die dort einen Durchmesser von 1,5 mm hatten, bewegten sich mit einer Amplitude von 5 mm auf und ab. Wir haben die Stellung der unteren Pupillenränder relativ zu einem Kreuz auf der Stirn der Probanden durch Auflegen transparenten Milimeterpapiers auf den Schirm gemessen. Die Position der Pupille konnte damit auf mindestens 0,5 mm genau bestimmt werden. Dies entspricht einer Genauigkeit von 5,5 Winkelgrad Bulbusstellung. Betrachten wir die extremen Horizontaldissoziationen, die im EOG bei vertikaler Augenbewegung auftraten (Abb.22-25) und immer über 20 Grad liegen, dann befinden sich unsere Rotationen weit über der Fehlergrenze der Einzelbildauswertung und müssen, wenn sie tatsächlich vorhanden sind,mit dieser Methode nachweisbar sein. Die Bulbusbewegungen beider Augen stellten sich bei der vertikalen Blickfolgebewegung in langsamer und schneller Phase völlig parallel dar.

Nach dem wir die dissoziierten Horizontalbewegungen als Artefakte bezeichnen konnten, wollten wir noch deren vermutete Ursache überprüfen. Wir hatten relativ zu hoch sitzende Nasalelektroden angenommen. Deshalb haben wir noch einmal 5 bereits vorher untersuchte Probanden herangezogen und bei ihnen die vertikalen Blickfolgebewegungen zunächst bei üblicher Elektrodenlage aufgezeichnet. Anschließend haben wir die 3 Horizontalelektroden entfernt und die nasale etwas tiefer erneut fixiert, die temporalen aber etwas höher. In den daraufhin geschriebenen EOG's waren die Artefakte verschwunden. Wenn nötig, wurden die Elektroden zu diesem Zweck noch ein 2. Mal versetzt. In jedem Fall konnten aber artefaktfreie Horizontalspuren erreicht werden. Die Ursache der Artefakte braucht nicht rein geometrisch zu sein. Vielmehr vermuten wir zusätzlich noch eine durch das biologische Material bedingte gerichtete Ausbreitung des E-Feldes, die sich de facto genau so auswirkt wie eine verdrehte Verbindungsachse der Horizontalelektroden. In unserem Vektormodell nehmen wir aber die

Einflusse der nasalen und temporalen Elektrodenlagen auf das vertikale EOG

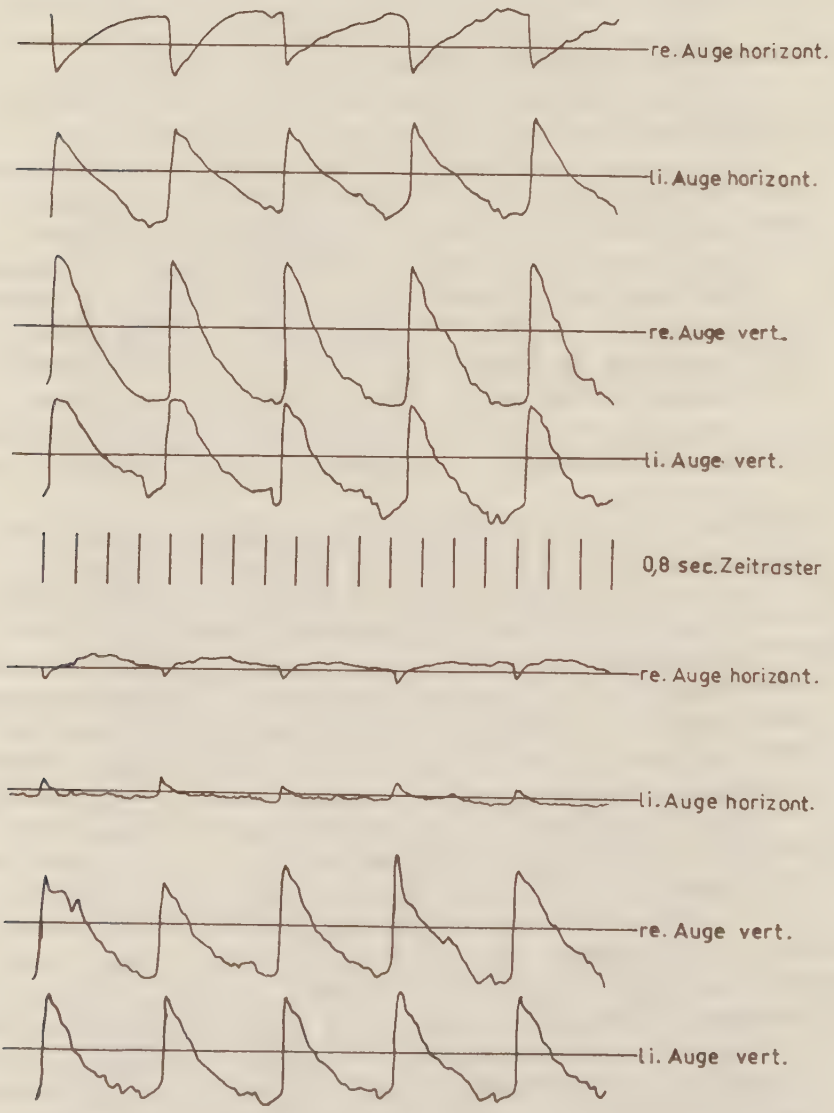


Abb.27

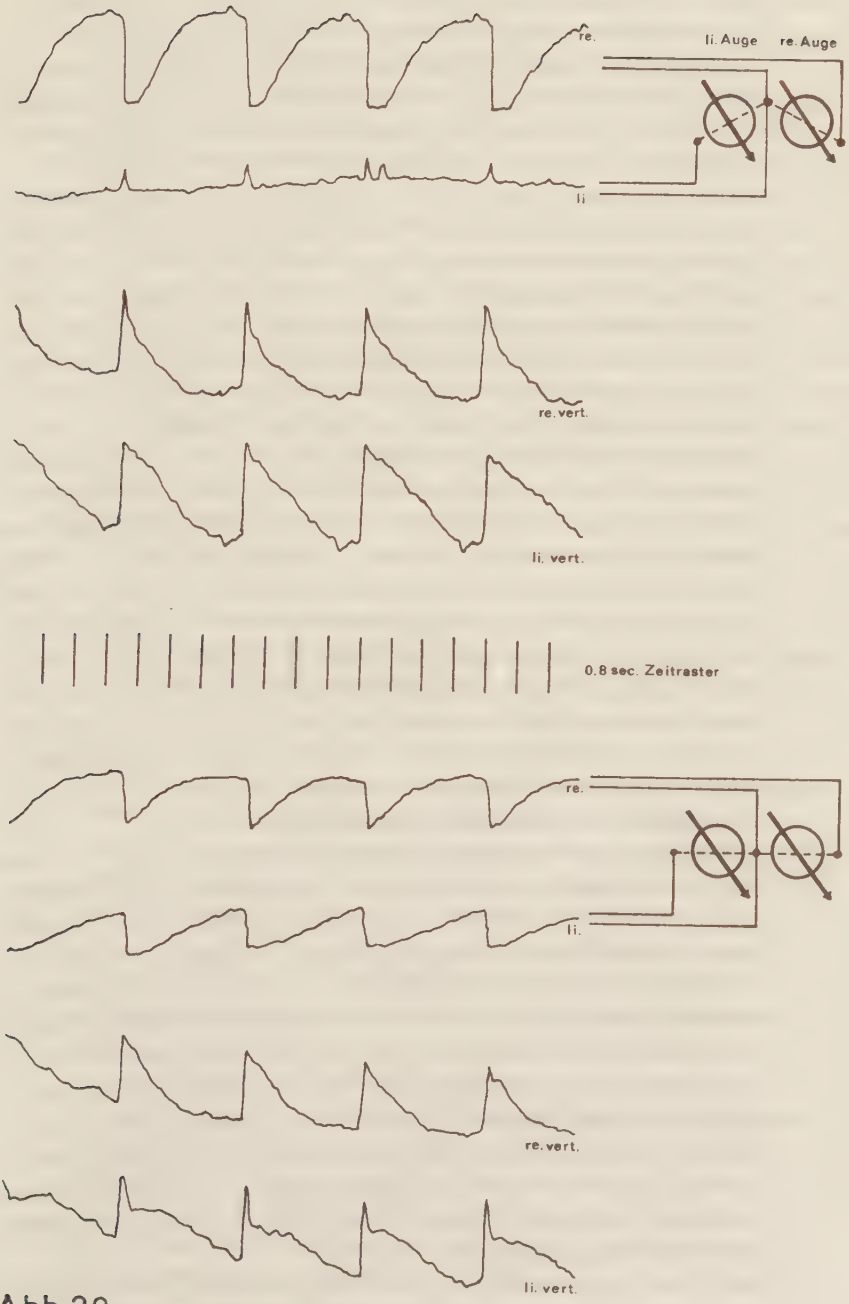

re.
li.
li. Auge
re. Auge
re. vert.
li. vert.
0.8 sec. Zeitraster
re.
li.
re. vert.
li. vert.

Abb.28

schrägen Elektrodenachsen als einzige Ursache an.Abb.27 zeigt die 4-spurigen EOG's,die bei vertikaler Blickfolgebewegung bei einem Probanden unter den üblichen Bedingungen abgeleitet wurden (oben) und die der gleichen Person nach geringer Veränderung der Elektrodenlagepositionen (unten). Auch die Aufzeichnung der Augenfolgebewegung bei schräg verlaufendem Stimulus weist auf die genannten Ursachen hin.In Abb. 28 sind Horizontal- und Vertikalspuren beider Augen bei Bewegung von oben links nach unten rechts aufgezeichnet.Im oberen Teil waren die Elektroden wie gewohnt angelegt worden: bei Vertikalbewegungen zeigten sich also die typischen horizontalen Gegenschläge.Die Diagonalbewegung projeziert sich hier nur auf die Verbindungslinie der rechten Horizontalelektroden ,nicht aber auf die der linken.Die linke Horizontalableitung ist also isoelektrisch.Da die Lage unserer 3 Horizontalelektroden bei zu hoher Nasalableitung der in dem von MALAVASI und MANGABEIRA ALBERNAZ angewandten Dreiecksschema entspricht,gleichen unsere Aufzeichnungen der Diagonalbewegung den auch dort registrierten.(21;22) Wir haben dann die Horizontalelektroden so versetzt,daß sie in einer Ebene lagen,dh. daß es bei vertikaler Bulbusbewegung keine Horizontalausschläge mehr gab.Die Diagonalbewegung muß sich dann auf beide Horizontalableitungen in gleicher Höhe und Richtung projezieren.Abb. 28, unten,zeigt das 4-spurige EOG dazu.Die Pfeile zeigen die Richtungen der langsamen Bewegungsphase an.

Wir erhielten die entsprechenden Ergebnisse auch bei Diagonalbewegungen in alle anderen Richtungen und es waren geometrisch erklärbare ,stufenlose Übergänge von Abb.28 oben zu Abb.28 unten möglich,sowie zwischen reiner Horizontal und reiner Vertikalbewegung .Wir glauben,daß damit Existenz und Ursache der mit Vertikalbewegungen gekoppelten Artefakte in den Horizontalspuren nachgewiesen ist. Dies schließt natürlich nicht aus, daß es unter pathologischen Bedingungen dissoziierte Augenbewegungen größerer Amplitude gibt, vor allem dann, wenn diese nicht streng synchron mit Vertikalbewegungen auftreten und ihre Richtung (Konvergenz oder Divergenz) nicht mit der senkrechten Bewegung korreliert.

Die Artefakte traten nicht nur bei unseren optokinetischen

Eichnystagmen auf, sondern auch beim Betrachten der Plastiken. Je mehr Vertikalbewegungen ausgeführt wurden, um so mehr herrschten in den CVG's beider Augen die typischen diagonalen Verlaufsrichtungen vor. Bei 65 % aller CVG's fiel deshalb ein gekreuzter Verlauf der Aufzeichnungen auf. Da es sich bei diesen Artefakten um völlig symmetrisch gegeneinander gerichtete und synchrone Erscheinungen handelt, kann man sie durch Mittelwertsbildung der zeitgleichen Meßwerte beider Augen eliminieren. Wir haben die Bewegungsmuster eines Zyklopenauges in den Kombinations-CVGs plotten lassen. Sie wurden angefertigt, indem jeder Meßwert der 4 Spuren der EOG's mit dem zugehörigen Reziprokwert der spez. Potentialdifferenz multipliziert wurde und aus den so gestreckten oder gestauchten Werten beider Augen jeweils die Mittelwerte der Vertikal- und Horizontalspuren gebildet wurden. Es ist nicht zulässig, umgekehrt erst die Mittelwerte der Meßwerte zu bilden und sie dann mit dem Reziprokwert der mittleren spezifischen Potentialdifferenz beider Horizontal- bzw. Vertikalspuren zu multiplizieren. Wenn nämlich eine Seite durch höhere Hautwiderstände geringere Amplituden zeigt, können sich beide Werte nicht gegenseitig aufheben ohne daß sie vorher einander größenmäßig angeglichen wurden. Nach den Mittelwerten wurden vom X-Y-Schreiben die CVG's gezeichnet. Sie geben auf jeden Fall den Weg des Fixationspunktes in Projektion auf eine Frontalebene wieder, gleichgültig ob die gegenschlägigen Aufzeichnungen in den EOGs Artefakte sind, oder (zu einem kleinen Teil) binokuläre Nah- bzw. Ferneinstellungsreaktionen wiederspiegeln. Bei der Naheinstellungskonvergenz gleitet der Schnittpunkt beider Augachsen nur auf der Längsachse des fiktiven Mittel- (14) auges näher heran. Bei Wechsel der Fixationspunkte treten unter unseren Bedingungen Konvergenzbewegungen jeden Auges von maximal 0,41 Grad auf, der Winkel zwischen beiden Augachsen liegt bei 2,86 bis 2,04 Grad.(24) Bei diesen geringen Abweichungen von der Parallelstellung entspricht die Stellung des Mittelauges weitgehend denen beider Augen. Abb.29-32 zeigen die CVGs des rechten und linken Auges und rechts daneben das Komb.-CVG, d.h. das Bewegungsmuster des Mittelauges. Letztere entsprechen natürlich den Formen der Plastiken wesentlich besser als die der Augen im einzelnen.

PLASTIK1 – REPRÄSENTATIVE C V G's

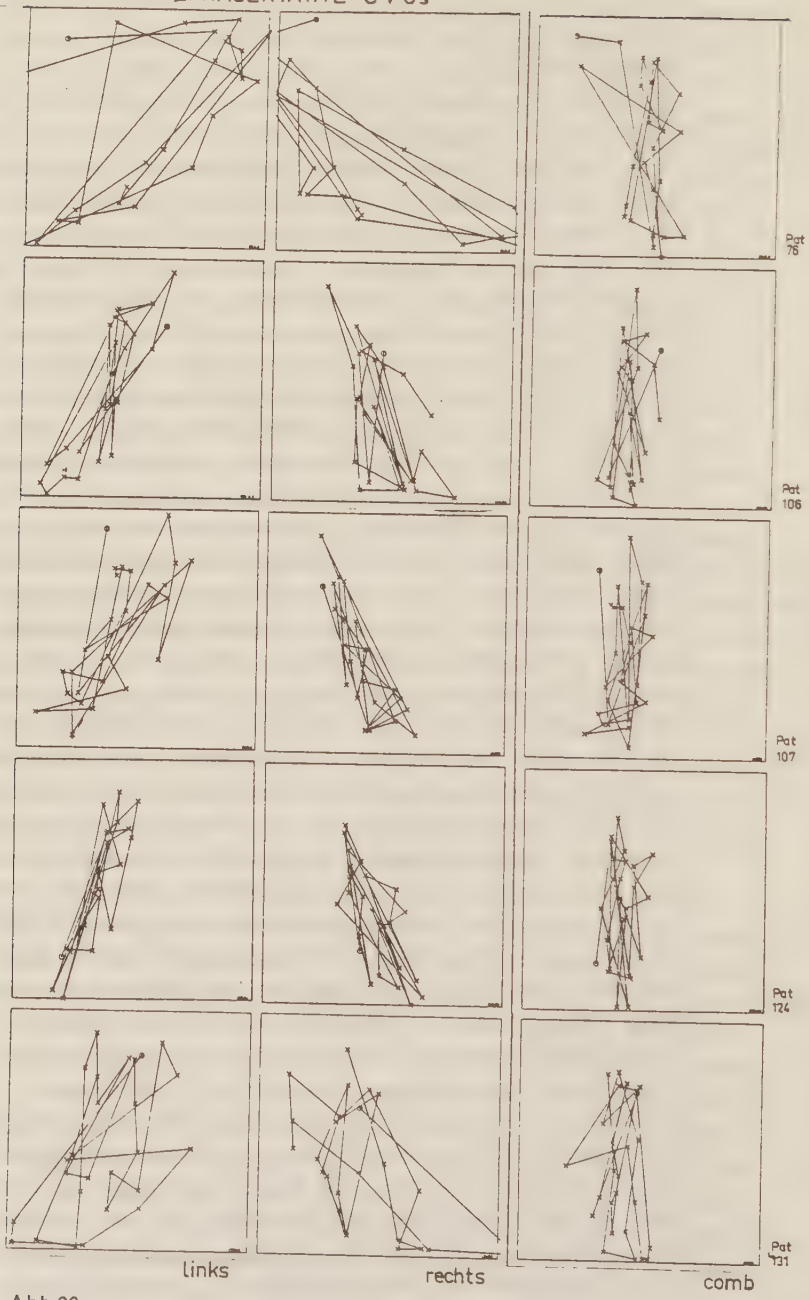


Abb.29

PLASTIK 2—REPRÄSENTATIVE CVG's

Abb. 30

PLASTIK 3 –REPRÄSENTATIVE C V G's

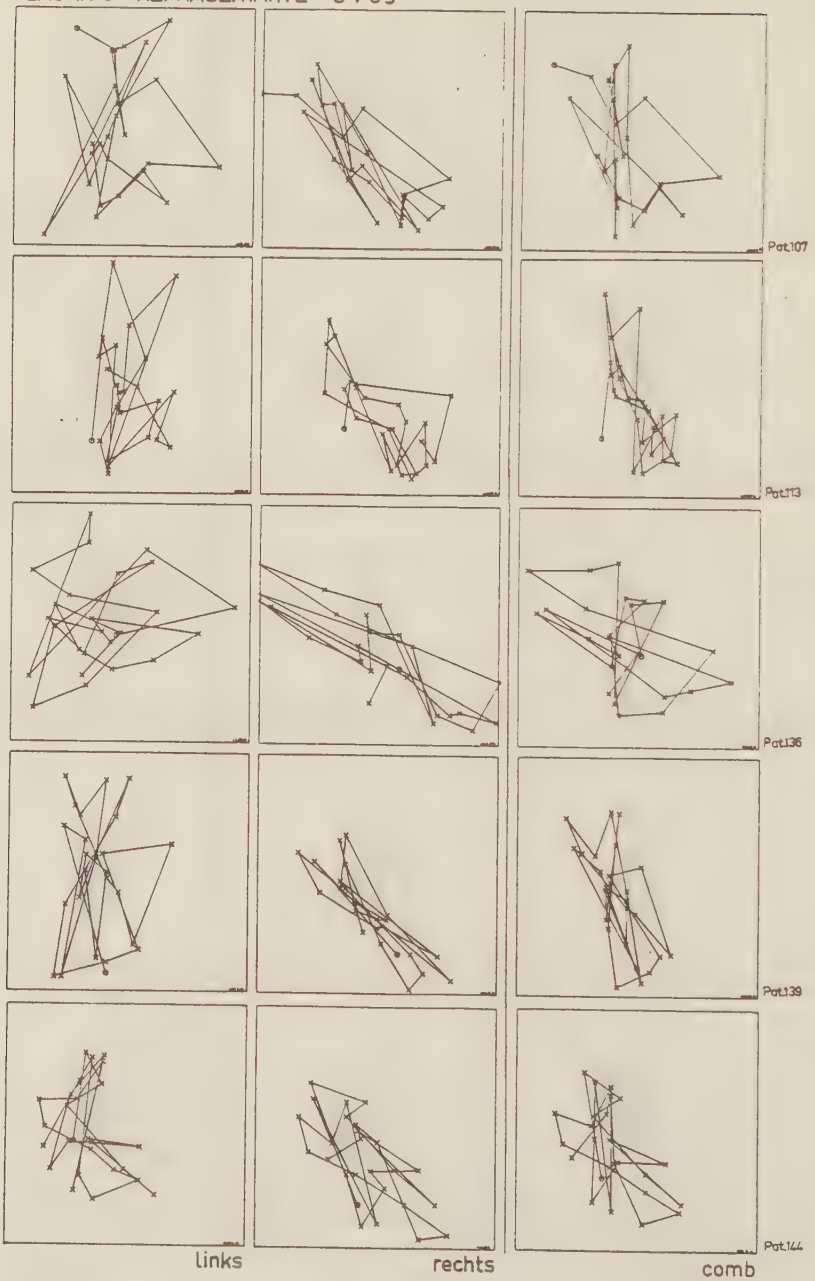


Abb. 31

PLASTIK 4 – REPRÄSENTATIVE C V G's

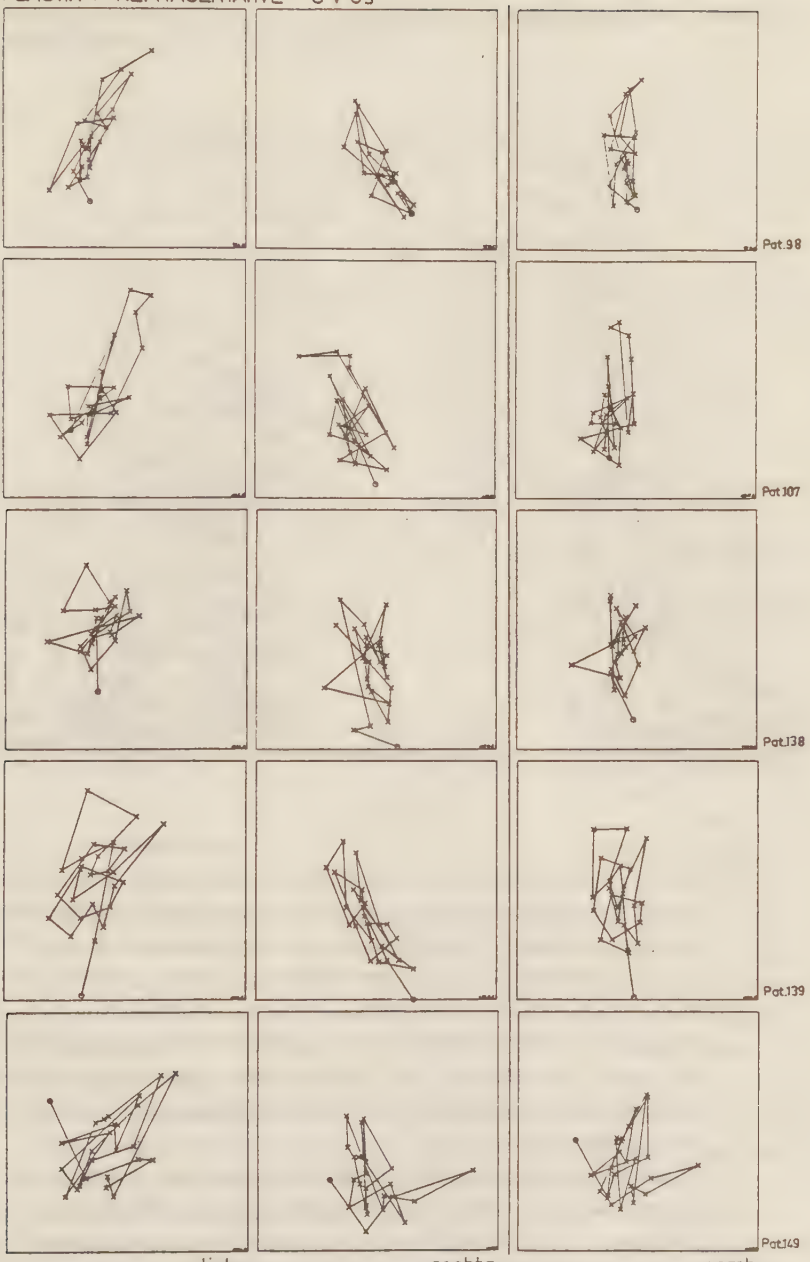


Abb. 32

PLASTIK 1 RE. UND LI. AUGE 45 PAT.

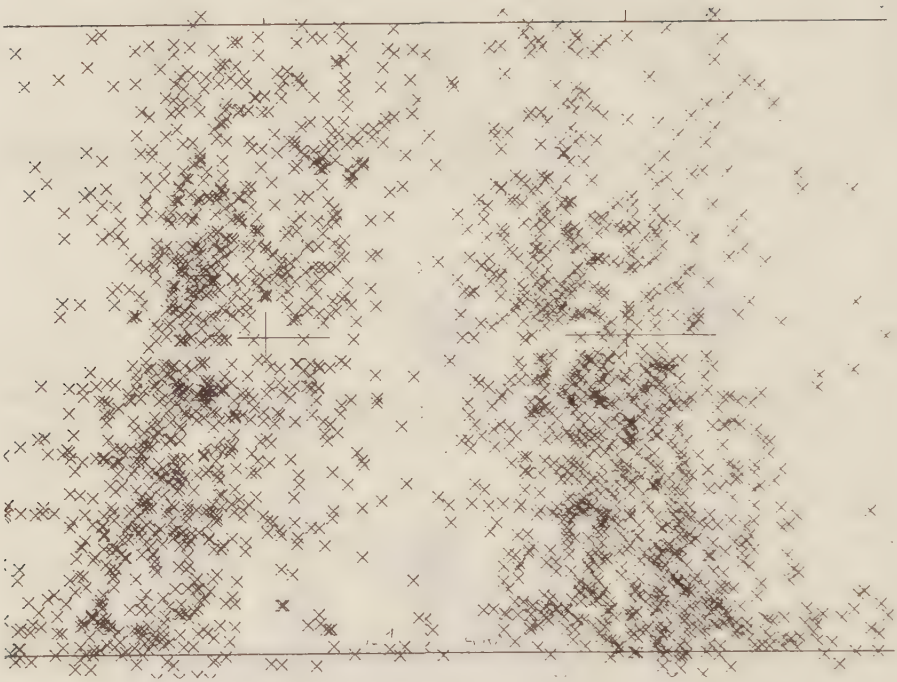


Abb.33

Um die häufigsten Fixationspunkte in einem Kollektiv bei einer Plastik darzustellen,haben wir Punktwolken plotten lassen.In ihnen sind von vielen Probanden die je 26 Punkte der einzelnen CVGs in einem Bild zusammengefaßt,ohne daß sie durch Linien verbunden sind.Die Punktwolke gibt also weniger Auskunft über vorherrschende Bewegungsrichtungen wie das CVG,sondern ihre Dichte ist ein Maß für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Fixationspunktes in einem bestimmten Areal.

Punktwolken wurden,wie auch die CVGs,für beide Augen getrennt und für das beschriebene fiktive Mittelauge angefertigt. Abb.33 zeigt als Beispiel die Punktwolken beider Augen von 45 Probanden beim Betrachten von Plastik 1. Abb.33,unten,enthält die Punktwolke der Mitteiaugen derselben

BEREICHE ERHÖHTER AUFENTHALTSWAHRSCHEINLICHKEIT
DER FIXATIONSPUNKTE ; BEIDE AUGEN

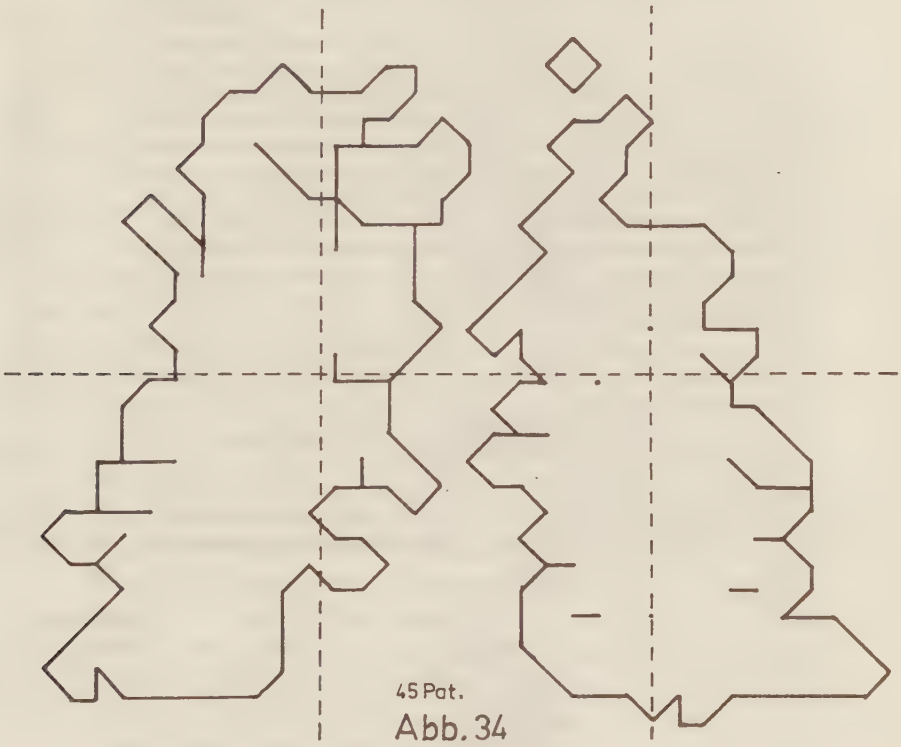
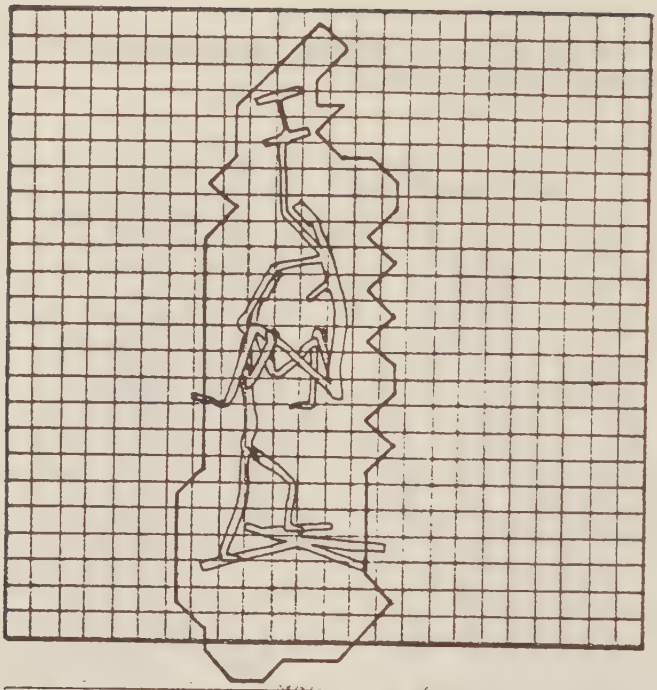


Abb. 34

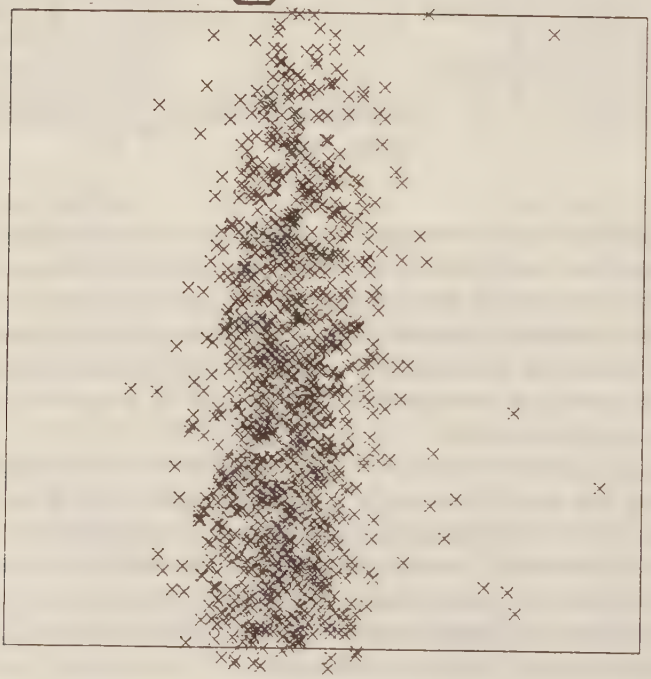
linkes Auge rechtes Auge

Gruppe. Wir haben die gesamte Fläche in 1/4 cm^2 -große Felder eingeteilt (Abb. 35, oben) und durch Auszählen der darin enthaltenen Kreuze Areale oberhalb, bzw. unterhalb einer bestimmten Flächendichte durch Striche getrennt, die durch die Mittelpunkte der kleinen Quadrate laufen. Dies dient der Kontrastverstärkung des Dichtegefälles zur Peripherie hin.

Die eingerahmten Areale der Abb. 34 sind die Verdichtungszonen der Abb. 33. Die gestrichelten Fadenkreuze sind die Zentren der Koordinatensysteme; man muß sie sich zur Deckung gebracht denken, denn sie entsprechen gleichen Ortswerten. Die Punktwolken beider Augen zeigen dann ähnlich gekreuzte Ausdehnungen wie die Verlaufsrichtungen der einzelnen CVGs. Die Punktwolke des Mittelauge bildet jedoch die Plastik gut ab. (Abb. 35)



Dichteverteilung
Plastik 1



Punktwolke
Plastik 1

45 Pat.
Abb. 35

KASUISTIK

Von den 150 Probanden, an denen mit dem beschriebenen Verfahren Augenbewegungen beim Betrachten der 4 Plastiken aufgezeichnet worden waren, wollen wir hier 4 Extremfälle vorstellen, um die Grenzen der Methode zu demonstrieren. Die auftauchenden Fehlerquellen werden teils kompensiert, teils machen sie die sinnvolle Anwendung unseres Verfahrens unmöglich. Wir haben für jeden Probanden eine Auswahl von CVG's zusammengestellt, damit sich der Betrachter selbst ein Bild machen kann.

FALL 1 :
Pat. 31, Malermeister, geboren 1935, CVGs Abb. 36 ,

Der Patient war wegen eines Hirnstamminsults eingeliefert worden und zeigte bei unserer Untersuchung noch eine Facialisparese rechts mit leichter Ptosis. Wegen hartnäckiger Kopfschmerzen wurde er noch mit Herzglykosiden und mit Dextraninfusionen behandelt. Er klagt über starke Übelkeit, Schweißausbrüche und minuten- bis stundenlange Schwindelanfälle. Dabei bewege sich alles um ihn herum. Für eine umschriebene Motilitätsstörung fand sich bei den zum Eichen benutzten Folgebewegungen kein Anhalt. Die Eichnystagmen waren in allen Richtungen sehr klein, aber gleichmäßig hoch. Die Gleichmäßigkeit der Bewegungen und die Aufmerksamkeit des Mannes lassen uns annehmen, daß immer der ganze Eichwinkel abgefahren wurde und die spezifischen Potentialdifferenzen nur wegen hoher Hautwiderstände, niedriger corneo-retinaler Potentiale oder wegen zu großer Entfernung der Elektroden von den Bulbi so klein waren. Diese kleinen Amplituden werden richtungsabhängig im Verfahren so ausgeglichen, daß winkel- und längengetreue CVG's entstehen. Der Patient machte sehr detaillierte Angaben über die Plastiken.

CVG's Pat. 31

Abb.36

FALL 2 :
Pat. 32, Gaststättenhelferin, geboren 1921, CVGs Abb.38 u.39, EOG Abb.37 .

Die 57-jährige Patientin war fünf Tage nach einem Sturz mit ausgeprägter deliranter Symptomatik eingeliefert worden. Sie zeigte auch bei unserer Untersuchung noch Tremor, eine Tachykardie, war ängstlich verspannt und lachte unkontrolliert. Die Probandin hatte weder bei offenen noch bei geschlossenen Augen einen Spontannystagmus im Sinne von CLAUSSEN, aber erhebliche motorische Unruhe, die als Sägezahn-Zacken mit Amplituden unter 20 µV in den Vertikalspuren erscheinen. Die Aufzeichnungen beim vertikalen Eye-tracking waren dagegen von deutlichen vertikal- und gegenschlägigen Horizontalnystagmen von 4 bis 5 Hz überlagert. Die gegensinnigen Signale in den Horizontalspuren, die genau mit den Vertikalausschlägen synchron auftreten und bei Aufwärtsbewegungen gegeneinander, bei Abwärtsbewegungen auseinander schlagen, sind als artefiziell zu betrachten. Es handelt sich um keinen diagonal verlaufenden Nystagmus, sondern um einen vertikalen Blickrichtungsnystagmus. Die schnelle Nystagmusphase war bei beiden Augen synchron nach oben gerichtet, wenn der Stimulus langsam von oben nach unten lief. Bewegte sich der Stimulus langsam von unten nach oben, so waren die Aufzeichnungen von abwärts gerichteten Nystagmen überlagert. In Abb. 37 sind optokinetische Nystagmen abgebildet, die bei langsamer Bewegung des Stimulus von oben nach unten und schnellem Sprung zurück auftraten. Es fällt auf, daß der Sprung zurück nur extrem verzögert und unter starken nystagtischen Überlagerungen vollzogen wird, während dafür die Abwärtsbewegung glatt und zu schnell erfolgt. Die Stimulusbewegungen stellen sich im EOG nur in kleinen Amplituden und so unregelmäßig dar, daß

Pat. 32 horizontale und vertikale Spuren nicht simultan aufgezeichnet

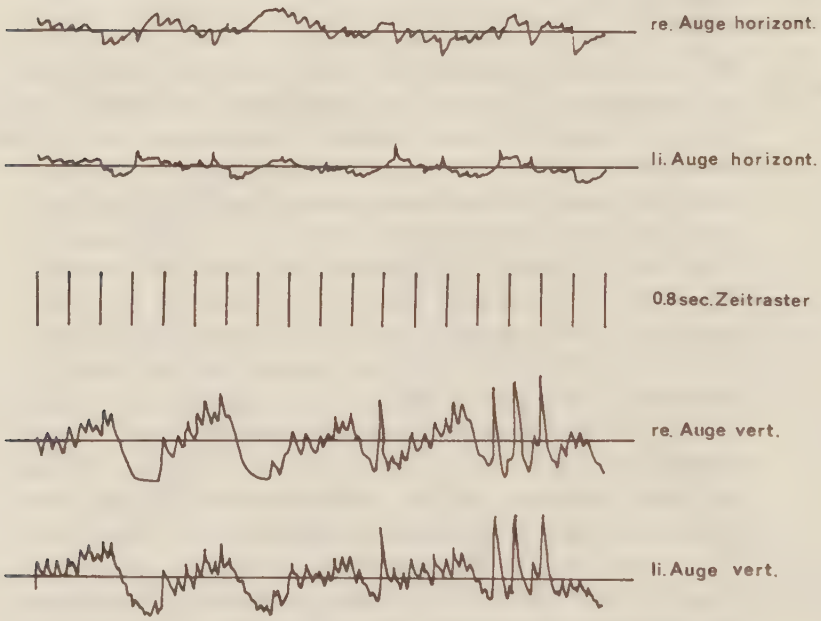


Abb. 37

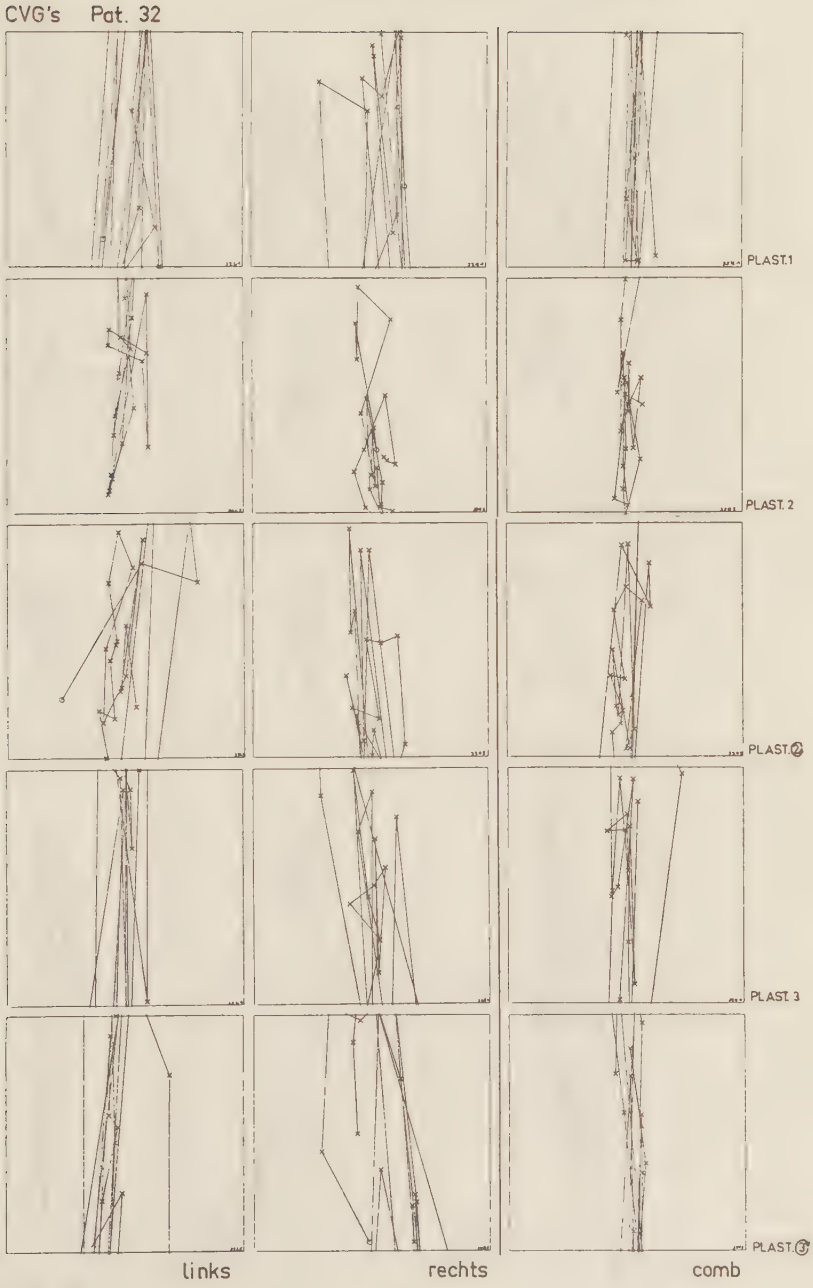

CVG's Pat. 32
PLAST.1
PLAST. 2
PLAST.2
PLAST. 3
PLAST.3
links
rechts
comb

Abb. 38

CVG's Pat. 32, konst. Eichfaktor

Abb. 39

man als Ursache nicht hohe Hautwiderstände oder geringes Bestandspotential annehmen muß, sondern das Unvermögen der debilen Patientin, den Stimulus horizontal oder vertikal zu verfolgen. Die Annahme, daß die Rotation der Bulbi beim Eichen über den ganzen Eichwinkel von 55,06 Grad erfolgt, ist also hier wahrscheinlich falsch und die CVGs werden extrem verzerrt (Abb.38). Zum Vergleich (Abb. 39) haben wir CVGs unter Verwendung der Mittelwerte aller spezifischen Potentialdifferenzen (µV/Grad) des gesamten Probandenkollektivs angefertigt. Daß diese den Konturen der Plastiken besser entsprechen, ist ein weiterer Hinweis dafür, daß der Eichstimulus nicht richtig verfolgt wurde. Jedoch lassen auch diese CVGs wegen der verwendeten hypothetischen spezifischen Potentialdifferenzen keine quantitativen Rückschlüsse auf die tatsächlichen Augenbewegungen zu. Wir stellten die Patientin vor, um zu zeigen, daß die Methode ein Minimum von Intelligenz und Kooperationsbereitschaft voraussetzt.

FALL 3 :
Pat. 137, Maler, geboren 1942, CVGs Abb.40.

Wir wollen hier einen weiteren Fall vorstellen, bei dem der Eichstimulus nicht vollständig verfolgt wurde. Im Gegensatz zu Fall 2 lag bei diesem kooperativen Patienten eine motorisch-organische Ursache vor. Der Proband war zwei Wochen zuvor mit zunehmenden okulomotorischen Störungen eingeliefert worden, die sich dann bis zur kompletten äußeren Ophthalmoplegie entwickelten. Die Ursache konnte nicht geklärt werden. Bei unserer Untersuchung war die Motilität in vertikaler Richtung bereits teilweise wiederhergestellt, während Horizontalbewegungen noch nicht möglich waren. Sie konnten weder willkürlich ausgeführt werden, noch waren sie reflektorisch auslösbar. Die Eichamplitude bei horizontal laufendem Stimulus war deshalb auch sehr klein. Dagegen zeigten sich beim Eichen mit vertikal laufendem Stimulus in den Horizontalspuren die typischen symmetrisch-gegenschlägigen Signale, die wie bei über 90% der untersuchten Probanden immer mit den Vertikalbewegungen gemeinsam auftraten.Es ist bei diesem Patienten absolut sicher, daß ihnen keine reelle Horizontalbewegung zugrunde liegt, da nicht nur die Horizontaleichung,sondern auch die neurologische Untersuchung die eindrucksvolle, komplette Lähmung der Augen für diese Bewegung bestätigt. Da auch beim freien Blicken diese Artefakte bei Vertikalbewegungen auftraten, und zwar in höherer Amplitude als der Eichamplitude, erklären sich daraus (über die kleineren horizontalen spezifischen Potentialdifferenzen) die exzessiven Horizontalbewegungen im CVG (Abb.40). Die Symmetrie und Synchronität dieser Ausschläge wird durch die gut zentrierten Kombinations-CVGs bewiesen.

CVG's Pat. 137

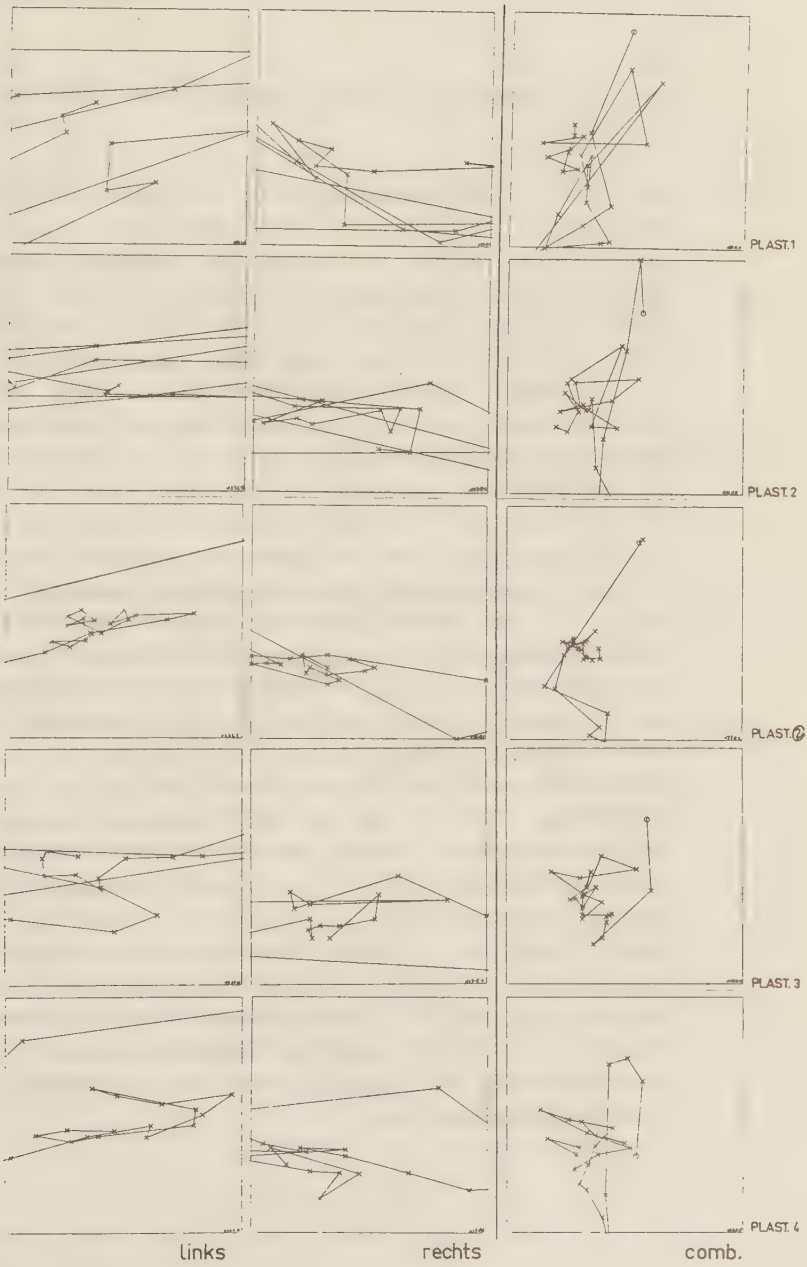


Abb. 40

FALL 4 :
Pat. 142, Bundeswehrsoldat, beboren 1956, CVGs Abb. 42 ,
EOG Abb. 41 .

Bei diesem Patienten möchten wir noch eine weitere Art von Artefakten vorstellen. Der Proband hatte vor drei Monaten bei einem Unfall das rechte Auge verloren. Es mußte samt den äußeren Augenmuskeln enukleiert werden. Wir haben trotz des fehlenden Auges die Elektroden in den üblichen, beschriebenen Positionen angebracht. Das linke Auge zeigte normale Augen-Folgebewegungen beim Eichen (Abb. 41). An den Elektroden um die leere rechte Orbita herum waren in senkrechter Richtung sehr kleine, mit den linken Ableitungen gleichgerichtete Potentialverläufe abgreifbar. Diese stammten offensichtlich von dem elektrischen Feld des erhaltenen linken Auges und waren nur wegen der größeren Entfernung kleiner. In der Ableitung bei Horizontalbewegung waren von den rechts angelegten Elektroden überraschend hohe elektrische Nystagmussignale ableitbar, die denen des linken Auges entgegengesetzt waren. Auch diese werden offensichtlich noch vom elektrischen Feld des linken Auges verursacht. Der Grund für die Gegensinnigkeit liegt in der Polung der 3 Horizontalelektroden. Aufgrund der kleineren spezifischen Potentialdifferenzen die sich für die Aufzeichnungen um die rechte Orbita errechneten, werden aus den Potentialschwankungen der rechten Elektroden im CVG normal hohe Ausschläge, die in vertikalwer Richtung mit denen des linken Auges gleichsinnig verlaufen, jedoch in den Horizontalbewegungen entgegengesetzt gerichtet sind. Die Gegenschläge in den beiden Horizontalspuren des EOG's unterscheiden sich in diesem Fall von den üblichen, beschriebenen Artefakten in dieser Spur. Sie treten nämlich, im Gegensatz zu diesen, unabhängig von Vertikalbewegungen auf.

Pat. 142 horizontale und vertikale Spuren nicht simultan aufgezeichnet

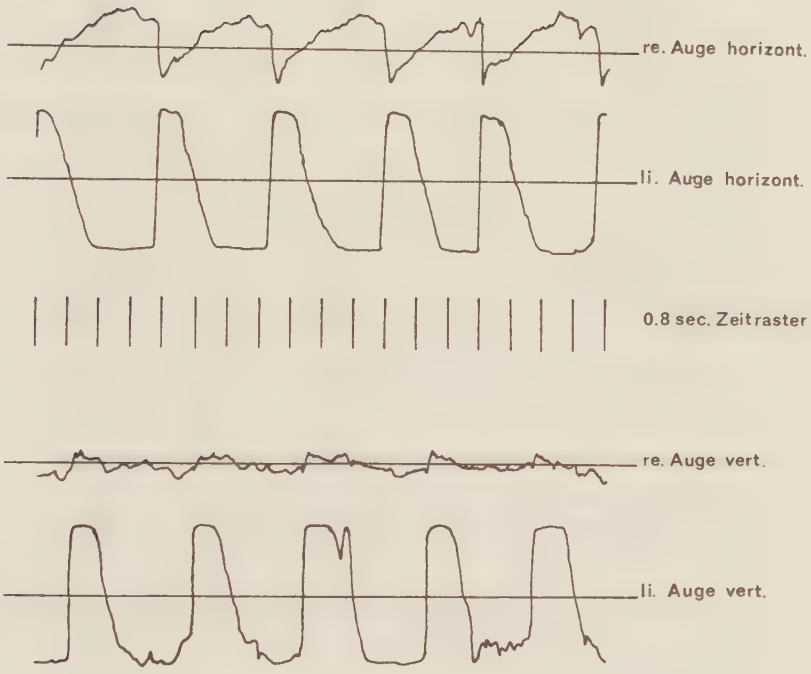


Abb. 41

CVG's Pat. 142

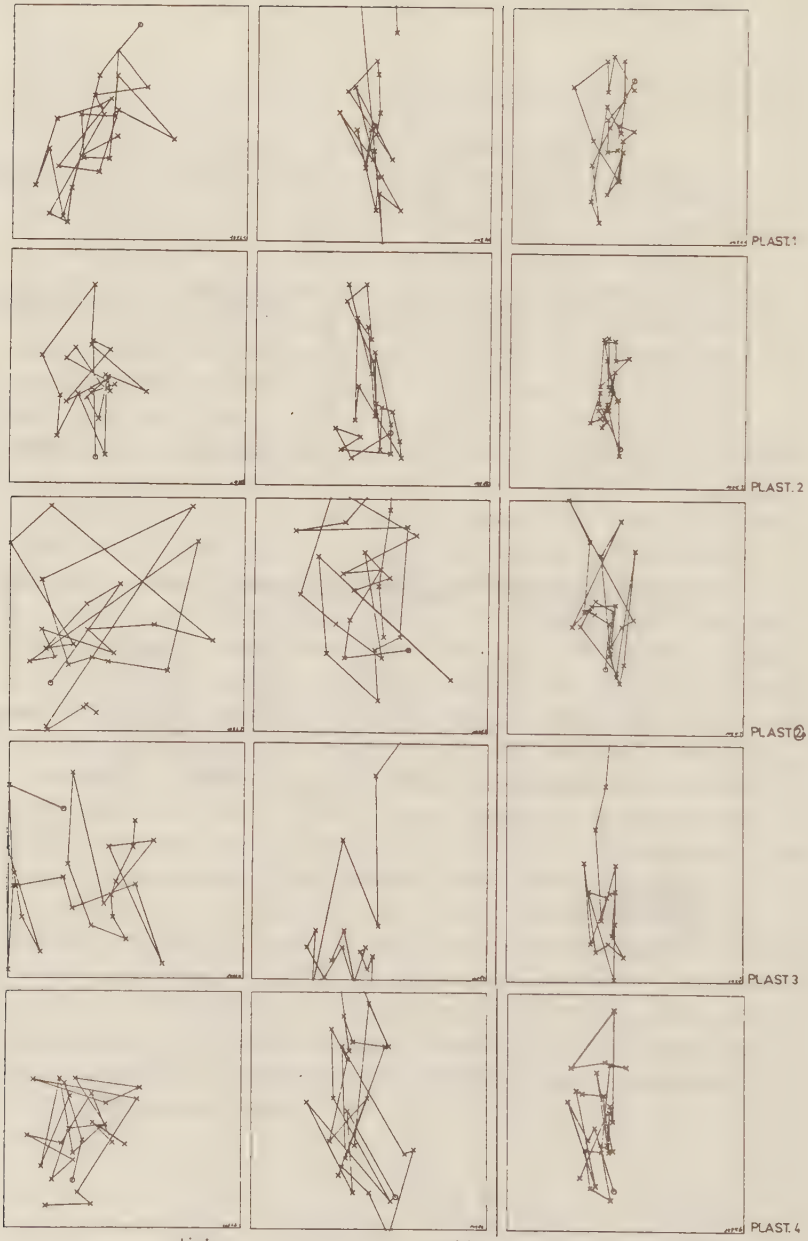


Abb. 42

DISKUSSION

Bei einer mehrstufig hintereinandergeschalteten Umformung von Information, wie sie in unserem Verfahren vorliegt, kann es unter ungünstigen Verhältnissen leicht zu einer Summierung von Fehlern kommen, die das Ur-signal letztlich bis zur Unkenntlichkeit verändern. Das verzerrte Ausgangssignal verführt dann den Untersucher zu Fehlschlüssen über das Untersuchungsobjekt.
Es gibt keinen Zweifel darüber, daß die exakteste okulographische Methode die optische Registrierung der Bulbusrotation durch reflektierte Lichtstrahlen ist, wie sie von YARBUS beschrieben und bis zur Perfektion entwickelt (29) wurde. Dabei werden miniaturisierte optische Einrichtungen - im einfachsten Fall ein Planspiegel - mit Saugnäpfen verrutschfest auf der Sklera befestigt, die dann die Augenbewegung mitmachen und per Lichtstrahl Bulbusrotationen von wenigen Winkelminuten unverzerrt und praktisch frei von Artefakten aufzeichnen. Allerdings muß das Auge vor Versuchsbeginn anästhesiert werden und die Augenlider müssen durch Klebestreifen offen gehalten werden. Die Untersuchungsdauer ist auf wenige Minuten begrenzt und die Versuchspersonen müssen auf höchstmögliche Unterdrückung der reflektorischen Lidschlußbewegungen trainiert sein. Dies alles beschränkt die Anwendung auf einen sehr kleinen Personenkreis: es konnten zwar sehr genaue Studien zur Physiologie der Augenbewegungen durchgeführt werden, doch schied die Untersuchung größerer Patientenkollektive aus.(15)
Wir wollten hier ein breit verwendbares elektro-okulographisches Verfahren und seine Erprobung an 150 unausgesuchten Probanden beschreiben. Der Grund für die einfache Anwendbarkeit liegt darin, daß nur ein bereits in der ENG routinemäßig benutztes Verfahren leicht modifiziert wurde. Die interessierende Größe, nämlich die Bulbusstellung und ihre Änderung mit der Zeit wird bei uns

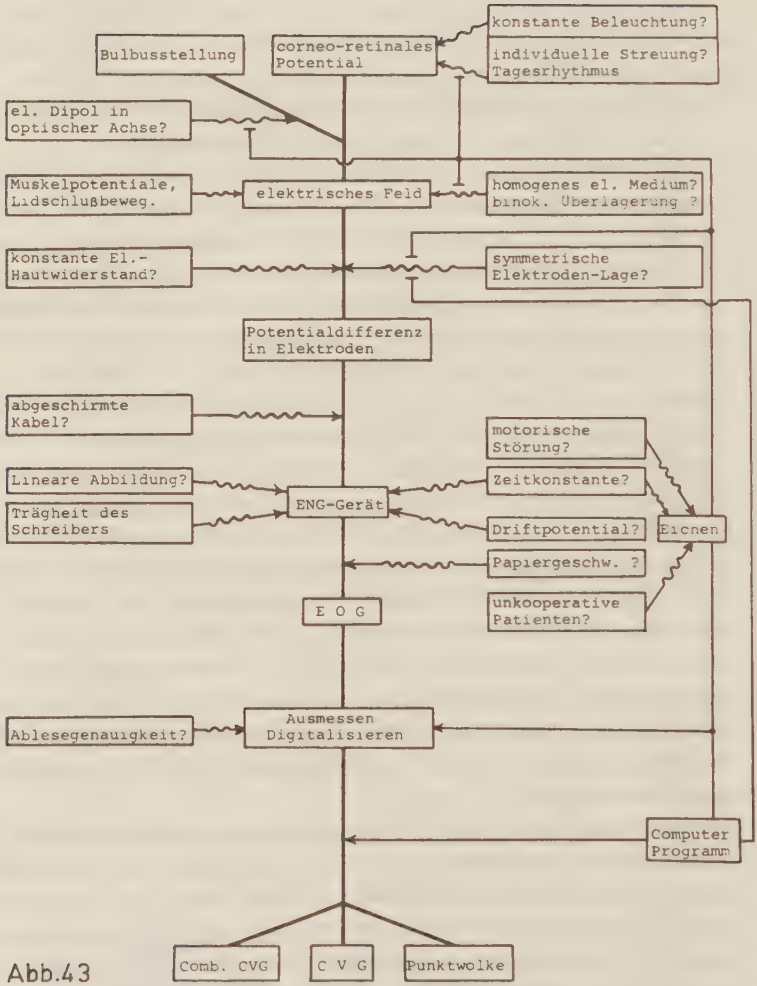

konstante Beleuchtung?
Bulbusstellung
corneo-retinales Potential
individuelle Streuung?
Tagesrhythmus
el. Dipol in optischer Achse?
Muskelpotentiale, Lidschlußbeweg.
elektrisches Feld
homogenes el. Medium?
binok. Überlagerung ?
konstante El.-Hautwiderstand?
symmetrische Elektroden-Lage?
Potentialdifferenz in Elektroden
abgeschirmte Kabel?
motorische Störung?
Lineare Abbildung?
Zeitkonstante?
Trägheit des Schreibers
ENG-Gerät
Eichen
Driftpotential?
Papiergeschw. ?
E O G
unkooperative Patienten?
Ablesegenauigkeit?
Ausmessen Digitalisieren
Computer Programm
Comb. CVG
C V G
Punktwolke

Abb.43

nur sehr indirekt registriert. Abb. 43 zeigt schematisch den Informationsfluß vom Ur-Signal (=Bulbusrotation) bis zur bewertbaren Aufzeichnung, dem CVG bzw. den Punktwolken. Die Schlangenlinien symbolisieren mögliche Störeinflüsse, parallele Blocks neben ihnen zeigen die Beseitigung oder Abschwächung einer Störung an. (12;13;16;23;26)
Man geht allgemein davon aus, daß die Ausrichtung des elektrischen Feldes der der optischen Bulbusachse entspricht und sich mit dieser verändert, seine Stärke aber konstant bleibt, bei beiden Augen und bei allen Probanden gleich ist. Wie von einigen Autoren angegeben, weicht die Achse des elektrischen Dipols und damit die des E-Feldes etwas von der optischen Längsachse des Auges ab. Die Abweichung sowie die ungleichmäßige Ausbreitung des E-Feldes im Gewebe und die Lage der Elektroden in verschiedenen Abständen vom Bulbus verbieten eine Eichung, die nur ermittelt, wieviel µV Potentialunterschied pro durchlaufenem Winkelgrad auftritt,und die der Spannung Null die Bulbusstellung bei Blick geradeaus zuordnet. Wir müssen vielmehr die abgegriffene Spannung in Beziehung zum fixierten Punkt in der Außenwelt setzen können, wobei natürlich die Kopfstellung relativ zur Umgebung nach dem Eichen konstant bleiben muß. Es ist uns dann gleichgültig, ob durch die absoluten Spannungswerte die Stellung der optischen Längsachse oder die einer anderen, davon abweichenden Achse abgebildet wird, soweit beide zueinander in fester Winkelbeziehung stehen. 50 µV Spannungsdifferenz in beiden Horizontal- und 30 µV in den Vertikalelektroden entspricht z.B. der Bulbusstellung bei Fixation des Zentrums unserer Plastik. Alle Änderungen der Spannung bei Blickbewegungen werden dann relativ zu diesen beiden Spannungswerten ausgemessen. Selbst wenn das Zentrum unseres Koordinatensystems zufällig genau in der anatomischen Richtung des Geradeausblickens liegt, brauchen und können wir nicht entscheiden, warum die abgeleiteten Potentialdifferenzen bei Fixation dieses Zentrums nicht Null sind. Dies könnte z.B. (1;23) (9;5) (22) (11)

an der Abweichung der elektrischen von der optischen Achse liegen, oder, wie im Modellversuch an den Überlagerungen beider Felder in den Horizontalableitungen. Der verwendete AC-Verstärker verhält sich insofern günstig, als er konstant ansteigende Zeigerausschläge mit der Zeit langsam zur Nullposition zurückführt. So liegen auch die Eichnystagmen auf dem Papier so, daß die Mittellinie zwischen Minima und Maxima nach einer gewissen Laufzeit der Nullposition des Zeigers entspricht, auch wenn die zugehörige Spannungsdifferenz in den Elektroden z.B. die erwähnten 50 µV in den Horizontal- und 30 µV in den Vertikalspuren sind. (13)

Trotzdem hätte eine größere Abweichung der elektrischen und optischen Achse voneinander eine genaue elektro-okulographische Aufzeichnung unmöglich machen können. Die meisten Blickbewegungen sind nämlich mit Rollbewegungen des Auges um seine Längsachse kombiniert. Diese führen (2;11; 19) zu keiner Veränderung des Fixationspunktes und interessieren uns hier nicht. Sie würden aber in der Aufzeichnung Bulbusrotationen um die senkrechte oder waagrechte Achse vortäuschen. Die Bewegungen der elektrischen Achse beim reinen Augenrollen wäre dann mit der der optischen Achse beim Abfahren eines Kreisabschnittes identisch.

In den elektrischen Erscheinungen ist nicht nur der Nullpunkt unseres Koordinatensystem verschoben, sondern auch die Achse verzerrt. Wir können also auch nicht die Änderungen der Potentialdifferenzen unverändert übernehmen. In vertikaler Richtung kommt es pro Winkelgrad Bulbusrotation zu stärkeren Änderungen der abgeleiteten Spannungen als in den Horizontalableitungen. Ebenso schwankt diese Größe zwischen beiden Augen und zwischen verschiedenen Patienten beträchtlich. Wir haben bei jedem Probanden über die Verwendung der spezifischen Potentialdifferenzen die Achsen des Koordinatensystems entsprechend gestaucht oder gestreckt und diese Differenzen dadurch ausgeglichen. Ob die Ursache der unterschiedlichen spezifischen Potentialdifferenzen

unterschiedliche corneo-retinale Potentiale (gleichzeitig Veränderung der Horizontal- und Vertikalspur) oder die unterschiedlichen Elektrodenhautwiderstände sind, brauchen wir nicht zu entscheiden. Beide Ursachen werden als Fehlerquellen ausgeschaltet. Dabei wird allerdings davon ausgegangen, daß sich diese beiden Parameter während der Untersuchung nicht ändern. Was die Elektrodenhautwiderstände betrifft, konnten wir einen minimalen Abfall von 4 % finden, den wir auf die Veränderung der Haut durch die ionenhaltige Elektrodencreme zurückführen. In einer anderen Untersuchung wurde ebenfalls festgestellt,daß sich der Widerstand an irgendeiner Hautstelle mit der Zeit nur minimal ändert und als praktisch konstant betrachtet werden kann. (12;26)

Dagegen kann es zu erheblichen Veränderungen des corneo--retinalen Potentials mit der Zeit kommen. Zirkadiane Schwankungen,denen dieses Potential unterliegt, können sich während einer Untersuchungszeit von ca. 40 min. nicht bemerkbar machen. AANTAA hat darauf hingewiesen, daß die (1) bioelektrische Aktivität der Retina aber auch sehr stark mit der Intensität des einfallenden Lichtes schwankt.

Die Lichtintensität im Raum war bei uns bei Betrachten der Plastiken konstant. Allerdings hatte der Proband beim Auswechseln einer Plastik durch eine andere die Augen für jeweils 5 sec. geschlossen. Nach AANTAA kann sich die bioelektrische Aktivität in dieser kurzen Zeit nicht stark genug geändert haben um einen nennenswerten Fehler unserer Aufzeichnungen zu verursachen. Die Änderung des corneo--retinalen Potentials erfolgte in seinen Experimenten nach Ein- bzw. Ausschalten der Beleuchtung nämlich nicht sprunghaft. Es war 8 min. nach Beginn der Dunkelheit um 32 % gefallen, ähnliche Werte lagen beim Anstieg nach Einschalten des Lichtes vor. Während der Drehung hatten die Patienten bei uns die Augen 3 min. lang geschlossen. Nachdem die Änderungen des retinalen Bestandspotentials linear verlaufen, nehmen wir die elektrischen Amplituden nach der Drehung als maximal um 10 % verkleinert an. (1)

Zusammenfassend können wir feststellen, daß unterschiedliche Elektrodenhautwiderstände (bzw. unterschiedliche Elektrodenentfernungen) und unterschiedliche corneo-retinale Potentiale bei unserem Verfahren keine Fehlerquellen sind, solange sie während der Untersuchung konstant bleiben. Das gleiche gilt für kleine Abweichungen der elektrischen Achse von der optischen Augachse. Bei größeren Abweichungen sind aber Rollbewegungen elektrisch nicht von Bewegungen der optischen Achse zu unterscheiden.
Wir können nur sehr ungenau beurteilen, inwieweit eine lineare Abhängigkeit der Elektrodenspannung von der Bulbusstellung besteht, da unser Registriergerät selbst ein linear ansteigendes Eingangssignal stark verzerrt. Von anderen Autoren wird aber in dem Bereich bis zu 40 Grad (7;18; Bulbusrotation diese Linearität angegeben. Wir können an 21) unseren optokinetischen Eichnystagmen in einem mittleren Bereich der langsamen Phase eine von der Bulbusbewegung linear abhängige Aufzeichnung erkennen. Einen Hinweis liefert auch die Arbeit von FRÖHLICH, in der durch ein (10) harmonisch schwingendes Pendel ausgelöste Blickfolgebewegungen aufgezeichnet worden waren. In den Amplituden der Aufzeichnungen fand sich das Dekrement der Pendelamplituden wieder. Wo dieses Dekrement nicht abgebildet wurde, könnten die verstärkten Spannungen im nicht mehr linearen Arbeitsbereich des Schreibwerkes gelegen haben.
Bevor wir die Eignung des Wechselstromverstärkers für die Elektro-okulographie abschätzen, müssen wir die zu verstärkenden Eingangssignale kurz charakterisieren:
Beim Eichen handelt es sich um die Aufzeichnung von Augenfolgebewegungen, d.h. von Bewegungen der Bulbi, die ständig auf einen bewegten Stimulus fixiert sind. Die Rotation des Auges erfolgt mit derselben Gleichmäßigkeit wie die (4;15) des Stimulus. Es kommt bei der Aufzeichnung für uns hauptsächlich auf genaue Wiedergabe der elektrischen Eingangsamplitude an.

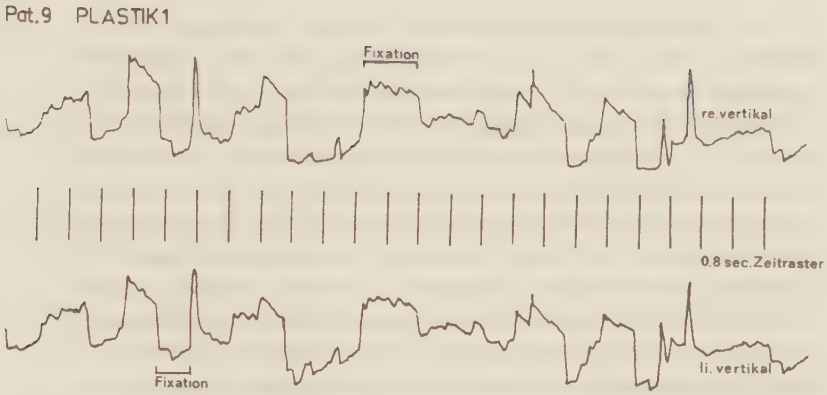


Abb.44

Davon völlig verschieden sind die okulären Bewegungsmuster, die beim Betrachten der Plastiken auftreten. Bei ruhig gehaltenem Kopf und unbewegten Objekten kann sich das Auge nur in einem von 2 möglichen Zuständen befinden: in dem der Fixation oder in dem des sprunghaften Wechsels von einem Fixationspunkt zum anderen (Blickzielbewegungen). Langsames Driften von einem Punkt zum anderen ist bei(3;15;29) stationären Bildern nicht möglich. Eine subjektiv als kontinuierlich empfundene Blickbewegung besteht in Wirklichkeit aus einem Wechsel von nicht wahrgenommenen Sakkaden und Fixationsintervallen. In der Fixation, während die Augen als unbewegt empfunden werden, treten physiologischerweise noch andere Bewegungen auf. Das ungerichtete Driften der optischen Achsen innerhalb eines sehr kleinen Winkels und der hochfrequente Augentremor von wenigen Winkelminuten Amplitude. Bei beiden Bewegungsmustern verläßt die Projektion des fixierten Punktes nicht die Fovea(15) centralis.Sie dienen vielmehr der Verbesserung der Sehschärfe. (25;28)

Diese Phänomene liegen außerhalb des räumlichen und zeitlichen Auflösungsvermögens unserer Apparatur.(20)
DECHER konnte zeigen,daß die Photo-Elektronystagmo- (7)
graphie eine höhere Empfindlichkeit hinsichtlich numerischer Nystagmusschlaganalysen (Schlagraten) besitzt.Als nicht-quantitative Methode ist sie zur Okulographie allerdings ungeeignet.
Daneben treten vor allem in längeren Fixationsperioden typische,unwillkürliche Sakkaden von größerer Amplitude auf.Sie sind zwar im EOG sichtbar,entfallen allerdings beim Glätten der Kurven und werden nicht ausgemessen.Das CVG bildet also nur die (willkürlichen) Makro-Bewegungen der Augen ab und läßt keine Aussage über die verschiedenen,u.a. von KORNHUBER angegebenen (18)
Mikro- (Drift-Sakkaden-Pendel) -bewegungen zu.Wir müssen sie von den schnellen Blicksprüngen beim Wechsel der Fixationspunkte unterscheiden.Außer den sehr kleinen Drifts und dem Tremor sind alle Bewegungen binokulär koordiniert. Die Dauer der Fixationsintervalle (4)
liegt etwa zwischen 0,25 und 0,8 sec.. Abb.44 zeigt die (29)
Vertikalaufzeichnungen beider Augen bei freiem Betrachten einer Plastik: die Fixationsperioden verschiedener Dauer zeigen die typischen Sakkaden. Alle Fixationsphasen sind hier nicht als Plateau aufgezeichnet, sondern sie fallen wegen der Null-Liniendrift des AC-Verstärkers zur Mitte hin ab. Sie sind durch beinahe senkrechte Linien verbunden, denn der Wechsel des Fixationspunktes erfolgt mit sehr hoher Winkelgeschwindigkeit. YARBUS hat den Zeitanteil (29)
dieser schnellen Wechsel bestimmt. Er beträgt nur ca. 5 % und erhöht sich etwas, wenn bei räumlichen Objekten noch Naheinstellungsbewegungen hinzukommen. Das Auge verbringt also 95 % der Zeit in Fixationsstellung.

Es muß hier auch darauf hingewiesen werden, daß ein rasches Ansteigen einer abgegriffenen Elektrodenspannung und ihr Verharren auf dem erreichten Spannungswert in der Aufzeichnung nach AC-Verstärkung bisweilen als Nystagmussignal im Sinne der Definition von CLAUSSEN fehlgedeutet werden kann. Als Nystagmussignal müssen danach alle dreiecksförmigen Aufzeichnungen angesprochen werden, deren an- und absteigende Schenkel ungleiche Steigungen aufweisen und deren elektrische Amplituden 20 µV übersteigen. (5)
Eine treppenförmige Eingangsspannung wird aber wegen des erwähnten Absinkens des Plateaus auch in Form eines solchen Dreiecks aufgezeichnet. Diese Elemente können jedoch an der stark unterschiedlichen Steigung beider Schenkel leicht erkannt werden. Durchgebogene Schenkel können nicht als Unterscheidungskriterium herangezogen werden, da sie auch bei den EOG's exakt dreieckiger Eingangsspannungen auftreten. Spannungsverläufe in Form von gleichschenkligen Dreiecken imponieren in der Aufzeichnung als ungleichschenklige Dreiecke.
Eine Phase unserer Blickfolgebewegungen beim Eichen dauerte etwas mehr als das Doppelte der Zeitkonstante des Wechselstromvertärkers. Die Aufzeichnung des dreiecksförmigen Eingangsignals muß deshalb als erheblich verzerrt angenommen werden: unsere Eichzacken haben keine Dreiecksgestalt, sondern sind an der Spitze abgeplattet. Dies liegt sowohl an der AC-Verzerrung, als auch an der nicht mehr linearen Aufzeichnung des Schreibers oberhalb von etwa 600 µV. Auch dreiecksförmige Eingangssignale höherer Frequenz sind deshalb abgeplattet, nicht jedoch solche mit geringerer Amplitude und hoher Frequenz. Lidschlußbewegungen haben meist eine gleich hohe, maximale Amplitude in den Aufzeichnungen und KÖTZ stellt in seiner Arbeit bei okulären Pendelfolgebewegungen eine Beschränkung der maximalen elektrischen Amplituden bei ca. 1000 µV fest, was sicherlich einer Begrenzung der Zeigerausschläge, nicht der (17)
elektrischen Eingangsspannung entspricht.

Unsere Eichnystagmen werden also in ihrer Amplitude verkleinert aufgezeichnet, und zwar 1. wegen der langen Phasendauer gegenüber der Zeitkonstante des Verstärkers und 2. wegen der nicht mehr linearen Aufzeichnung ab ca. 600 µV bei Schreibstufe 1 des Geräts. Dadurch wird der Wert unserer spezifischen Potentialdifferenz zu klein und die freien Blickbewegungen im CVG werden als zu groß wiedergegeben, sofern ihre Amplitude unter ca. 800 µV liegt und ihre Winkelgeschwindigkeit ca. 16 Grad/sec. wesentlich übersteigt. Wie oben beschrieben,werden die Sakkaden zwischen 2 Fixationsphasen jeweils mit sehr hoher Rotationsgeschwindigkeit ausgeführt. Sie werden also mit zu hoher Amplitude wiedergegeben. Es ist aber zu berücksichtigen, daß häufig nicht entgegengesetzte Zielpunkte wechselseitig angelaufen werden, sondern sich das Auge nach kurzer Fixationsperiode in der gleichen Richtung weiterbewegt, so daß sich eine treppenförmige Aufzeichnung ergibt. Während der Fixation hält aber der Zeigerausschlag nicht das erreichte Niveau, sondern fällt exponentiell ab. Der treppenförmig endlich erreichte Zeigerausschlag hat dann das gleiche Amplitudendefizit wie eine in gleicher Zeit kontinuierlich angestiegene Eingangsspannung, ergibt also im CVG einen richtigen Ortswert. Je schneller ein Zielpunkt vom Auge erreicht wird, umso mehr übersteigt die zugehörige Bewegung im CVG den richtigen Maßstab. Natürlich erfolgt der Wechsel der Fixationspunkte mit hoher Geschwindigkeit, doch wird im CVG wegen des groben Zeitrasters meist eine Mittellinie durch treppenförmige Augenbewegungen aufgezeichnet. Zur groben Orientierung kann man sagen, daß 2 aufeinanderfolgende zentral liegende Punkte im Original-CVG (=12x12 cm) mit einem Abstand von ca. 2 bis 7 cm einen richtigen Ortswert haben, da die durchschnittliche Winkelgeschwindigkeit zwischen ihnen der beim Eichen verwendeten entspricht. (Wir haben auch bei schrägen Bewegungen dabei die Geschwindigkeitsvektoren, die sich auf die Waagrechte und Senkrechte projezieren mit der Eichgeschwindigkeit verglichen.) Alle Punkte,

die weiter voneinander entfernt sind, liegen zu weit in der Peripherie, alle mit zu kleinem Abstand liegen zu zentral. Dieser Bereich gilt nur für Strecken, vor denen ein Richtungswechsel stattgefunden hat, bei Streckenabschnitten, die in einer Richtung liegen aber für die Summe aller Einzelabschnitte. Da aber innerhalb eines Zeitintervalls von 0,8 sec. mehrere Richtungswechsel stattgefunden haben können, handelt es sich hier nur um einen groben Anhaltspunkt.

Zusammenfassend müssen wir darauf hinweisen, daß Einwände gegen das Verfahren, die sich auf das elektrische Amplitudendefizit der niederfrequenten Eichamplituden stützen, nicht uneingeschränkt haltbar sind. Was nutzt eine amplitudengetreue Aufzeichnung eines hochfrequenten Eichnystagmus, wenn über den AC-Verstärker die Amplituden der freien Blickbewegungen verkleinert werden? Wir müssen vielmehr beim Eichen den gleichen quantitativen Fehler im EOG bekommen wie bei der Masse der freien Blickbewegungen. Nur dann kann das CVG in einem begrenzten Bereich die Augenbewegungen genau wiedergeben.

Artefakte im EOG (ENG)

Von vielen Autoren werden die makroskopischen Augenbewegungen als streng konjugiert beschrieben. Der Schnittpunkt beider Augachsen liegt danach genau im fixierten Punkt. Bei den in der Elektronystagmographie üblichen Elektrodenlagepositionen sind aber in der Ableitung Vertikalbewegungen scheinbar mit typischen gegenschlägigen Horizontalbewegungen gekoppelt, die binokuläre Konvergenzreaktionen beim räumlichen Sehen weit übersteigen. Auch GABERSEK, der 8 Elektroden um die Augen legte und dann für jeden Bulbus 2 Horizontal- und Vertikalableitungen aufzeichnete, bekam bei Vertikalbewegungen gegenschlägige Aufzeichnungen in Horizontalspuren. Er deutete sie ebenfalls nicht als reelle Augenbewegungen um die senkrechte oder waagrechte Achse. Als Erklärung führt er die Abweichung der elektrischen von der optischen Bulbusachse an.

(4;14; 15)

(11)

Wir haben darauf hingewiesen, daß Rollbewegungen dann tatsächlich Horizontalbewegungen vortäuschen könnten. Allerdings beobachtet GABERSEK die dissoziierten Ausschläge nur in den beiden oberen, auf der Stirn gelegenen, nicht jedoch in den unteren,auf der Wange gelegenen Horizontalableitungen. Letztere blieben bei Vertikalbewegungen isoelektrisch. Wie wir am Beispiel des Falles 4 der Kasuistik feststellten, reicht das elektrische Feld eines Auges sogar bis in die andere Gesichtshälfte. Es erscheint uns deshalb unwahrscheinlich, daß eine elektrische Feldveränderung nur in einem von 2 parallel liegenden nur wenig voneinander entfernten Elektrodenpaaren abgreifbar ist. Die Höhe der dissoziierten Horizontalausschläge, die sich in der Größenordnung der Vertikalausschläge bewegt, spricht nach theoretischen Überlegungen ebenfalls gegen ihre Entstehung durch Rollbewegung des Auges um die optische Achse. Die Abweichung der elektrischen Achse sowie der Rollwinkel müßten dann erhebliche Ausmaße erreichen. Wir führen die Artefakte auf geometrische und/oder elektrophysikalische Differenzen zwischen Nasal-und Temporalelektroden zurück und können dies durch Aufzeichnung nach Elektrodenlageveränderung bei vertikaler und diagonaler Augenbewegung begründen.

Wichtiger als die Ursache der Artefakte sind die Möglichkeiten ihrer Beseitigung. Wie erwähnt, lassen sie sich durch Versetzen der Horizontalelektroden eliminieren.Allerdings muß bisweilen eine Elektrode mehrfach fixiert und wieder gelöst werden, um die richtige Position zu finden. Dies entspricht einem Abtasten des elektrischen Mediums auf der Suche nach Isopotentiallinien bei vertikalen Bulbusbewegungen.Dies ist sehr zeitraubend und bedeutet für den Probanden eine erhebliche Belästigung.Es ist aber unumgänglich,wenn der Verdacht auf pathologisch dissoziierte Augenbewegungen besteht und eine exakte Aufzeichnung beider Bulbi getrennt voneinander erforderlich ist.In den üblichen elektro-nystagmographischen Methoden wird

dies oft nicht berücksichtigt und führt dazu, daß der Befund "gegenschlägiger Horizontalnystagmus" bzw. bei Berücksichtigung der gleichzeitigen Vertikalbewegung "dissoziierter Diagonalnystagmus" gestellt wird, wenn es sich nur um einen gleichgerichteten Vertikalnystagmus handelt. Gegenschlägige Horizontalnystagmen können nur dann sicher diagnostiziert werden, wann sie im ENG zeitlich unabhängig von Ausschlägen in der Vertikalspur auftreten.
Eine andere Möglichkeit haben wir durch Bildung der Mittelwerte aus den Ausschlagshöhen beider Horizontal- und Vertikalspuren und das Plotten von Kombinations-CVGs angewendet. Die Summe der symmetrischen artefiziellen Gegenschläge ist nämlich zu jedem Zeitpunkt Null. Wir haben dabei den Verlust der Aufzeichnungen beider Augen im einzelnen in Kauf genommen.

EOG und CVG
Daß die Aufzeichnungen in den EOGs noch weiter zum CVG umgeformt wurden, hat, abgesehen davon, daß erst das CVG die Augenbewegungen anschaulich macht, noch weitere Vorteile, die sich daraus ergeben, daß im Zwischenschritt alle Daten gemeinsam gespeichert, leicht abrufbar, und beliebig umformbar sind. So konnten einige Fehlerquellen eliminiert werden, z.B. die durch die beschriebenen Artefakte aufgetretenen. Die kontinuierliche Ableitung von den Elektroden muß in Einzelwerte zerhackt und gespeichert werden. Der Nachteil des angewendeten Verfahrens ist es sicherlich noch, daß dies durch manuelles Ausmessen der Kurven und anschließendes Eintippen der Daten auf Magnetplatten erfolgte. Dies beschränkt die Zahl der Daten, durch die eine Bewegung abgebildet wird. So wäre ein Zeitraster von ca. 0,1 sec. wünschenswert, da es unter der Dauer der kürzesten von YARBUS angegebenen (29) Fixationsperioden liegt und deshalb zwischen 2 Meßpunkten höchstens eine große Sakkade liegt, durch die der Fixationspunkt gewechselt wird. Dies kann zwar bei höherer Papier-

geschwindigkeit des Schreibers (vom Hellige-Gerät 60 mm/sec) ausgemessen werden, doch bedeutet dies einen unverhältnismäßig hohen Zeitaufwand. Nachdem die Methode an 150 Probanden problemlos angewendet wurde und in der beschriebenen Form bereits zu brauchbaren Ergebnissen geführt hat, halten wir es für lohnend, ihre Präzision und Anwendbarkeit noch weiter zu verbessern. Dazu bietet sich ein au- (27)
tomatisches Digitalisieren der abgegriffenen und verstärkten Spannungsverläufe und deren direkte Speicherung auf Magnetplatte an. CLAUSSEN entwickelt gerade ein ähnliches Verfahren zur automatischen Nystagmusauswertung, bei dem über ein entsprechendes Computerprogramm die hohen Spikes der Lidschlußbewegungen eliminiert werden. Als Zeitraster schlagen wir 0,1 sec. vor. Auch die Computerprogramme zum Plotten der CVGs und der Punktwolken könnten noch verbessert und erweitert werden. In den Zentren der Punktwolken könnten mehrere Kreuze durch andere Zeichen repräsentiert werden, damit keine homogen schwarzen Felder mehr entstehen. Wir haben in der dünn besetzten Peripherie Areale von 1/4 cm^2 Fläche mit gleicher Punktzahl durch Striche verbunden und damit das Dichtegefälle kontrastiert. Dies könnte auch in dichter besetzten, zentralen Bereichen über ein Programm vom Plotter eingezeichnet werden.
Schließlich könnte man die gesamte Charakteristik der Signalumformung von der Bulbusbewegung bis zum verstärkten Spannungsverlauf mit in das Computerprogramm aufnehmen. Dies könnte dann auch systematische Fehler wie die definierte AC-Verzerrung oder die arc-tan-Beziehung zwischen Bulbusrotation und fixiertem Punkt ausgleichen. Die zu berücksichtigende Verzerrung eines Signals in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit seiner Änderung und seiner absoluten Größe müßte dabei empirisch, nicht theoretisch-mathematisch ermittelt werden.

ZUSAMMENFASSUNG :

Nach einer bioelektrischen Eichung wurden über sieben Elektroden die Augenbewegungen von 150 Probanden beim Betrachten von Stahlplastiken in vier Spuren registriert.Die Information wurde nach manuellem Ausmessen diskret-analog auf Magnetplatten übernommen.Von einem X-Y-Schreiber wurden über ein Computerprogramm die Wege der Fixationspunkte in Koordinatensysteme eingezeichnet.Durch Plots mit je 26 repräsentativen Fixationspunkten eines Probanden konnten Interessenverteilungen großer Kollektive sichtbar gemacht werden.
Es wird auf die Signalverzerrung durch AC-Verstärker,und anhand eines elektrischen Feldmodells und Einzelbeobachtungen an Probanden auf abgreifbare Spannungen bei verschiedener Bulbusstellung eingegangen.
Bei Vertikalbewegungen werden dabei artefizielle Horizontaldissoziationen festgestellt,deren Ursache in der Lage der Elektrodenachsen zum E-Feld liegt.Sie können zu Fehlinterpretationen in der Elektro-Nystagmographie führen.Es werden Möglichkeiten zur Vermeidung der Artefakte gezeigt.

LITERATURVERZEICHNIS :

1)AANTAA,E.:
ON THE STABILITY OF THE CORNEO-RETINAL POTENTIAL DURING ENG RECORDING
Ges. für Neurootologie und Aequ.,Bd.I,1975,S.110-119

2) ALEXANDER,G.,MARBURG,O.:
HANDBUCH DER NEUROLOGIE DES OHRES
Bd.I,1924,S.1089-1116; Bd.III,1926,S.513-600
Urban&Schwarzenberg,Berlin-Wien

3) BRIDGEMAN,B.:
FAILURE TO DETECT DISPLACEMENT OF THE VISUAL WORLD DURING SACCADIC EYE MOVEMENTS
Vision Research 15,1975,S.719-722

4) CASHELL,C.T.W.,DURRAN,M.:
GRUNDRISS DER ORTHOPTIK
Springer Verlag,Berlin-Heidelberg-New York 1969

5) CLAUSSEN,C.F.,LÜHMANN,M.V.:
DAS ELEKTRONYSTAGMOGRAMM UND DIE NEUROOTOLOGISCHE KENNLINIENDIAGNOSTIK
Edition Medizin und Pharmazie,
Hamburg-Neu Isenburg 1976

6) COLLEWIJN,H.,VAN DER MARK,F.,JANSEN,T.C.:
Vision Research 15,1975,S.447-450

7) DECHER,H.:
VESTIBULARIS-FEINDIAGNOSTIK MITTELS NYSTAGMOGRAPHIE
Dr.Alfred Hüthig Verlag,Heidelberg 1965 (Bd.28)

8) FENDER,D.H.,NYE,P.W.:
AN INVESTIGATION OF THE MECHANISMS OF EYE MOVEMENT CONTROL
Kybernetik,Bd.I,1961/1963,S.81-88

9) FREY, R.G.:
ELEKTROOCULOGRAPHISCHE REGISTRIERUNG VON DISJUNKTIVEN AUGENBEWEGUNGEN UND VON BLICKBEWEGUNGEN UNTER PRISMEN-BELASTUNG.
Archiv für Ophthalmologie 166, 1963, s. 345-358

10) FRÖLICH, E.:
DIE AUGENBEWEGUNGEN BEI SINUSFÖRMIGER BLICKPENDELFOLGE.
Inaugural-Dissertation, Univ. Würzburg, 1976

11) GABERSEK, V.:
EVOLUTION DES RESPONSES ELEKTRONYSTAGMOGRAPHIQUES APRES ARTERIOGRAPHIE.
Ges. für Neurootologie und Aequ., Bd. IV, 1975, S.147-170

12) HENNING, H.:
ÜBER DIE AUSWAHL UND DIE ANLAGE VON ELEKTRONYSTAGMO-GRAPHIEELEKTRODEN.
Ges. für Neurootologie und Aequ., Bd. I, 1975, S.135-148

13) HENRIKSSON. N.G., PAHLM, O.:
ON THE FORMATION OF THE NYSTAGMUS SIGNAL BY THE INFLUENCE OF ELEKTRICAL TIME CONSTANTS.
Ges. für Neurootologie und Aequ., Bd. I, 1975, S.149-159

14) HOFSTEIN, C.V.:
THE ROLE OF CONVERGENCE IN VISUAL SPACE PERCEPTION
Vision Research I, 1976, S. 193-198

15) HONEGGER, H., SCHÄFFER, W.D.:
REGISTRIERUNG VON AUGENBEWEGUNGEN ALS BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DER SEHSCHÄRFE FÜR BEWEGTE OBJEKTE.
Archiv für Ophthalmologie 166, 1964, S. 601- 616

16) HORTMANN, G.:
ÜBER TECHNISCHE BESONDERHEITEN HEUTIGER ELEKTRONYSTAGMOGRAPHIE GERÄTE.
Ges. für Neurootologie und Aequ., Bd. I, 1975, S.120-134

17) KÖTZ, B.D.:
ÜBER EINEN OPTOKINETISCHEN LESETEST MIT HILFE DER ELEKTRONYSTAGMOGRAPHIE.
Inaugural-Dissertation, Univ. Würzburg, 1977

18) KORNHUBER, H.H.:
HANDBOOK OF SENSORY PHYSILOGY, VESTIBULAR 6, VOL. 2
Spriger Verlag, Berlin,Heidelberg, New York, 1974

19) LANG, J.:
ANATOMISCHE GRUNDLAGEN DES VESTIBULÄREN GLEICHGEWICHTS
Ges. für Neurootologie und Aequ., Bd. I, 1975, S.17-50

20) MACKENSEN, G.:
DIE UNTERSUCHUNG DES SCHWACHSICHTIGEN AUGES
SCHIELEN 38. Heft, S. 191 ff
Ferdinand Enke-Verlag Stuttgart 1961

21) MANGABEIRA ALBERNAZ, P.L. u. GANANCA,M.M.:
VERTIGEM
Edition Moderna Sao Paulo/Brasil 1976

22) MANGABEIRA ALBERNAZ, P.L. u. GANANCA,M.M.:
LABIRINTOLOGIA
Editamed, Sao Paulo 1976

23) MARG, E.:
DEVELOPMENT OF ELEKTRO-OCULOGRAPHY
Archives of Ophthalmology 45, 1951, S. 169-185

24) OTTO, J.:
LEHRBUCH UND ATLAS DER ORTHOPTIK
Verlag Hans Huber, Bern, Stuttgart, Wien 1975

25) SCHÄFER, W.D.:
DIE BEDEUTUNG DES NYSTAGMUS IN DER OPHTHALMOLOGIE
Ges. für Neurootologie und Aequ., Bd. I, 1975, S.318-332

26) SCHÜTTLER, O.:
ÜBER DIE BEEINFLUSSUNG DER MEHRKANAL-AC-ELEKTRONYSTAGMO-
GRAPHIE DURCH DEN ELEKTRODENHAUTWIDERSTAND.
Inaugural-Dissertation, Univ. Würzburg, 1977

27) TONDROW, M.M.:
OKULÄRE BEWEGUNGNGSMUSTER BEIM BETRACHTEN RÄUMLICHER
STRUKTUREN
Inaugural-Dissertation, Univ. Würzburg in Vorbreitung 1980

28) TULUNAY-KEESEY, U., JONES, R.M.:
THE EFFECT OF MICROMOVEMENTS OF THE EYE AND EXPOSURE
DURATION ON CONTRAST SENSIVITY.
Vision Research I, 1976, S. 481-488

29) YARBUS, A.L.:
EYE MOVEMENT AND VISION
Plenum Press New York 1967

Herrn Prof. Dr. Claus F. Claussen danke ich für die Überlassung des Themas und die freundliche Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit und der Auswertung der Ergebnisse.

Herrn Prof. Dr.W.Kley danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferates.

Lebenslauf

Rainer Karl Michael Wodatschek,geboren am 23.11.53 in Eschwege.

Vater:Karl Wodatschek,Lehrer

Mutter:Maria Wodatschek,geb.Titz

Schule:Grundschule ab 1959

Abitur 1973 an der Friedrich-Wilhelm Schule in Eschwege.

Studium:Ein Semester Mathematik in Göttingen,

ab 1974 Medizin in Würzburg.Med.Staatsexamen im April 1980.

Die vorliegende Arbeit wurde 1977/78 angefertigt.

Rainer Wodatschek